

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL CHIMBORAZO



FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE FÍSICA Y MATEMÁTICA

CARRERA DE BIOFÍSICA

*“DETECCIÓN DE PARTÍCULAS CÓSMICAS MEDIANTE LA ELABORACIÓN DEL
PROTOCOLO DEL AGUA DE LOS DESHIELOS DEL CHIMBORAZO PARA EL
DETECTOR CHERENKOV”*

TESIS DE GRADO

Previa la obtención del título de:

BIOFÍSICA

Presentado por:

TALÍA BEATRIZ TENE FERNÁNDEZ

RIOBAMBA-ECUADOR

2012

AGRADECIMIENTO:

A Dios sobre todas las cosas, por bendecirme, con una grandiosa familia y permitirme gozar de la compañía de excelentes maestros, compañeros y amigos, durante mi carrera universitaria.

Un agradecimiento especial a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, por abrirme sus prestigiosas puertas para adquirir conocimientos de tan dilectos profesores como son la doctora Jenhy Orbe, el doctor Arquímedes Haro y la doctora Magdy Echeverría, que han sido los principales guías de este trabajo.

A la comunidad científica LAGO, principalmente a Xavier Bertou, Ph.D., por involucrarme en su campo de investigación y por la hospitalidad brindada durante mi estadía en San Carlos de Bariloche.

Talía

DEDICATORIA:

*A Emiliano Fernández Cuenca,
por ser ejemplo de trabajo, visión y
tenacidad.....*

NOMBRE	FIRMA	FECHA
Dr. Silvio Álvarez Luna. DECANO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS
Dra. Jenhy Orbe Ordoñez. DIRECTORA DE LA ESCUELA DE FÍSICA Y MATEMÁTICA
Dra. Jenhy Orbe Ordoñez. DIRECTORA DE TESIS
Dr. Arquímedes Haro V. MIEMBRO DEL TRIBUNAL
Dr. Richard Pachacama MIEMBRO DEL TRIBUNAL
Tecnólogo Carlos Rodríguez. DIR. DEPARTAMENTO DE DOCUMENTACIÓN
NOTA DE LA TESIS ESCRITA	

DERECHOS DE AUTORÍA

“Yo Talía Beatriz Tene Fernández, soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en esta Tesis, y el patrimonio intelectual de la Tesis de Grado pertenecen a la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo”

.....

TALIA BEATRIZ TENE FERNÁNDEZ

C.I.: 110452977-9

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

%	Porcentaje
A	Amstrongs = $1 \cdot 10^{-10}$
°C	Grados Centígrados
A	Área
ADC	Analog to digital converter, conversor análogo-digital.
DAC	Digital to analog converter, Conversor Digital-Analógico.
EAS	Extensive air shower, Se refiere a los chubascos extensos de partículas.
eV	Electronvoltios
FADC	Flash analog to digital converter. Conversor Análogo-Digital Veloz.
FWHM	Full width half maximum. Ancho De Un Pulso A Media Altura.
g	Gramos
GeV	Giga electronvoltios = $1 \cdot 10^9 \text{eV}$
GRB	Gamma Ray Burst. Destello de Rayos Gamma.
H	Altura
H₂O	Agua
J	Joulios
KeV	Kilo electronvoltios = $1 \cdot 10^3 \text{eV}$
L	Litros
LAGO	Large Aperture GRB Observatory.
LS	Local Station, Instrumento Electrónico Usado Para La Toma De Datos.

m	Metros
m/s	Metros sobre segundo
m²	Metro cuadrado
m³	Metro cúbico
MeV	Mega electronvoltios = $1 \cdot 10^6 \text{eV}$
mg	Miligramos
ml	Mililitros
mm	Milímetros
nm	Nanómetros
PLD	Programable Logic Device, Dispositivo Lógico Programable.
PMT	Photomultiplier Tube, Tubo Fotomultiplicador.
Ppm	Partes por millón.
SPT	Single Particle Technique, Técnica De Partículas Individuales.
TeV	Tera electronvoltios = $1 \cdot 10^{12} \text{eV}$
WCD	Water Cherenkov detector. Detector Cherenkov De Agua.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	i
ABSTRACT.....	ii
INTRODUCCIÓN.....	iv
ANTECEDENTES.....	v
JUSTIFICACIÓN.....	vii
OBJETIVOS.....	ix
HIPÓTESIS.....	x
 CAPITULO I	
1. MARCO TEÓRICO.....	2
1.1 RADIACIÓN CÓSMICA.....	2
1.1.1 Generalidades.....	2
1.1.2 Destellos de rayos gamma, GRB'S.....	8
1.2 RADIACIÓN CHERENKOV.....	10
1.2.1 Historia.....	10
1.2.2 Descripción del efecto Cherenkov.....	11
1.2.3 Construcción del frente de ondas.....	13
1.2.4 Interpretación teórica de la radiación Cherenkov.....	15
1.2.5 Campo de radiación y distribución espectral.....	24
1.2.6 Duración del destello de luz.....	25

1.2.7	Modificaciones introducidas por la teoría cuántica.....	27
1.2.8	Consideraciones prácticas del medio.....	31
	a) Índice de refracción de la luz.....	31
	b) Absorción de la luz.....	33
	c) Dispersión de la luz.....	34
1.3	DETECTOR CHERENKOV DE AGUA (WCD).....	35
1.3.1	Generalidades.....	35
1.3.2	Propiedades de los detectores Cherenkov.....	36
1.3.3	Descripción del prototipo del tanque detector Cherenkov de agua.....	38
1.3.4	Electrónica.....	39
1.4	AGUA.....	41
1.4.1	Generalidades del agua.....	41
1.4.2	Propiedades del agua.....	42
1.4.3	Características de absorción y transmisión de luz en varias muestras de agua natural.....	44
1.4.4	Absorción de la luz en el agua.....	45
1.4.5	Actividad fotosintética y la penetración de la luz.....	47

CAPITULO II

2.	PARTE EXPERIMENTAL	52
2.1.	METODOLOGÍA	52

2.1.1	Tipo de investigación.....	53
2.2	MUESTREO.....	53
2.3	MÉTODOS Y TÉCNICAS.....	58
2.3.1.	Métodos.....	58
2.3.2	Técnicas.....	59
2.4	DATOS EXPERIMENTALES.....	60
2.4.1.	Diagnóstico.....	60
2.4.2.	Datos.....	6
	a) Datos del análisis físico químico.....	62
	b) Datos del análisis de absorbancia.....	63
	c) Datos de los análisis microbiológicos.....	64
2.5	CORROBORACIÓN DE LA HIPÓTESIS.....	64

CAPITULO III

3.	LÍNEA DE INVESTIGACIÓN.....	67
3.1.	BASE DE PARTIDA.....	67
3.2.	TRATAMIENTOS APLICADOS.....	68
3.3.	RESULTADO DE LOS TRATAMIENTOS APLICADOS.....	70
3.4.	CÁLCULOS.....	71
3.4.1.	Determinación del número de fotones producidos en agua.....	71
3.4.2.	Determinación del número de fotones absorbidos.....	74
3.5.	RESULTADOS.....	76

3.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	78
3.7 PROPUESTA.....	82

CAPITULO IV

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	84
4.1 CONCLUSIONES.....	84
4.2 RECOMENDACIONES.....	86

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1:	Cascada electromagnética.....	3
Figura 1-2:	Creación de pares.	7
Figura 1-3:	Dispersión Compton.	7
Figura 1-4:	Explosión de una hipernova.	9
Figura 1-5:	Campo polarizado por un electrón.	12
Figura 1-6:	Trayectoria AB de un electrón viajando a la velocidad de la luz.....	12
Figura 1-7:	Frente de onda de Huygens.	14
Figura 1-8:	Formación del cono Cherenkov y sus vectores de polarización.....	21
Figura 1-9:	Ángulo Cherenkov (θ).....	26
Figura 1-10:	Ángulo de incidencia ε y refracción ε'	32
Figura 1-11:	Estructura del prototipo de tanque Cherenkov.....	38
Figura 1-12:	Esquema de detección.....	39
Figura 1-13:	Fotomultiplicador.....	39
Figura 1-14:	Molécula de agua.....	41

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1:	Índice de refracción para algunos medios (20°C).....	32
Tabla 1-2:	Índice de refracción del agua (20°C), para distintas longitudes de onda.....	43
Tabla 1-3:	Composición de pigmentos y longitud de onda, utilizados por organismo fototrofos.....	49
Tabla 2-1:	Muestras de agua natural, sin tratamiento.....	54
Tabla 2-2:	Muestras de agua tratada.	57
Tabla 2-3:	Indicadores de análisis de laboratorio.....	60
Tabla 2-4:	Datos análisis físico químico.....	62
Tabla 2-5:	Datos análisis microbiológico.	64
Tabla 2-6:	Corroboración hipótesis.....	65
Tabla 3-1:	Dosis de cloración.....	69
Tabla 3-2:	Datos utilizados en los cálculos.....	71
Tabla 3-3:	Datos del espectro de luz visible.....	72
Tabla 3-4:	Energía umbral de acuerdo a distintos índices de refracción.....	72
Tabla 3-5:	Número de fotones producidos por un electrón en un milímetro de recorrido dentro de diferentes muestras de agua con diferente índice de refracción.....	73
Tabla 3-6:	Coeficientes de atenuación de acuerdo a su longitud de	

	onda.....	74
Tabla 3-7:	Porcentaje de fotones absorbidos en las distintas muestras	
	de agua.....	76
Tabla 3-8:	Número de fotones no absorbidos y que podrían llegar al	
	PTM.....	76

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1-1:	Composición de radiación secundaria en función de la altura.....	6
Gráfica 1-2:	Absorción de luz en varias muestra de agua.....	44
Gráfica 1-3:	Perfil de penetración de la luz.....	45
Gráfica 1-4:	Perfil vertical de absorción diferencial de los componentes de la luz visible.....	46
Gráfica 1-5:	Espectro de absorción in vivo de varios microorganismos fototrofos.....	50
Gráfica 2-1:	Comparación de la absorbancia de fotones en diferentes muestras agua.....	63
Gráfica 3-1:	Comparación de la absorbancia en diferentes muestras de agua tratada.....	70
Gráfica 3-2:	Energía umbral del electrón en función del índice de refracción.....	79
Gráfica 3-3:	Carga total en ADC.....	82

ÍNDICE DE FOTOS

Foto 1-1:	Prototipo del tanque ubicado en la ESPOCH, “Chimbita”.....	38
Foto 1-2:	Tarjeta digitalizadora.....	42
Foto 2-1:	Volcán Chimborazo a 4530 msnm.....	55
Foto 2-2:	Volcán Chimborazo a 4589 msnm.....	55
Foto 2-3:	Facultad de Ciencias.....	56
Foto 3-1:	Fuente de agua ubicada a 4530 msnm.....	67
Foto 3-2:	Fotografía de la radiación Cherenkov.....	80
Foto 3-3:	Pulso en un osciloscopio.....	81

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A:	Métodos normalizados para la toma de muestras
ANEXO B:	Agua pura: fundamentos
ANEXO C:	Instrucciones equipo purificador de agua mediante destilación por termocompresión.
ANEXO D:	Método para medir el índice de refracción en un líquido
ANEXO E:	Protocolo del agua del detector Cherenkov.

RESUMEN

El presente trabajo describe la radiación Cósmica, la física de la radiación Cherenkov y las características ideales del medio detector de la radiación, el agua, para posteriormente elaborar el protocolo de purificación del agua de los deshielos del volcán Chimborazo con el objetivo de obtener mejores resultados en la detección de partículas cósmicas, mismo que fue realizado en base a las características iniciales del agua y los resultados posteriores de la aplicación del tratamiento de purificación.

Para caracterizar el agua se analizaron distintas muestras en el laboratorio obteniendo resultados de las propiedades físico químicas, micro-bacteriológicas y de absorción, característica de mayor importancia del agua como detector de la radiación cósmica, una vez que se caracterizó el agua, se eligió y aplicó el tratamiento más adecuado: la cloración por choque, logrando así disminuir la absorción de los fotones Cherenkov en el agua de los deshielos de Chimborazo, en el rango de (350 a 750) nm y asegurando el estado óptimo del agua por aproximadamente dos años. Se recomienda dar seguimiento a esta investigación mediante el registro de pulsos del prototipo del Tanque Cherenkov, para corroborar el estado del agua.

ABSTRACT

PHYSICS

COSMIC PARTICLE DETECTION

It is important to find out cosmic particles in water by using Cherenkov detector. There wasn't any physical and chemical procedure to know water properties from Chimborazo mount. This research was developed to establish physical and chemical water properties, as well as its microbiological composition; to design a plan for water treatment; and determine the number of fotons which can be absorbed by water.

Some samples of water were analyzed to find out physical, chemical and microbiological properties. It was choosen a water source to treat it in the Cherenkov reservoir and identify the number of fotons which were produced and those absorbed by means of chlorination by impact.

Results showed that:	Fotons produced:	17 per mm of water flowing
	Fotons Absorbed:	11.7 % for red wave length
		6.6 % orange
		1.0 % yellow
		3.7 % green
		5.0 % blue
		5.7 % violet

Conclusions showed that chlorination by impact has bacterial effects, avoid algae growth and reduce iron and magnesium in water. It is an easy and economic treatment and can be applied in any place.

Recommendations include: to get Amino-G compound for future treatments, to follow the instructions provided in this research by recording pulses of “Tanque Cherenkov” prototype, and monitoring water quality.

INTRODUCCIÓN

Constantemente partículas provenientes del espacio exterior, llegan a la atmósfera terrestre, estas partículas se denominan rayos cósmicos y son imperceptibles al ojo humano. Los de más bajas energías provienen del sol y de otras estrellas cercanas. Otros más energéticos pueden provenir del centro de la galaxia, de explosiones de estrellas o de otros efectos violentos en la galaxia o fuera de ella [15]. Dado su amplio espectro de energía que va desde los 10^5 eV, hasta los 10^{20} eV [22], constituyen un misterio científico, pues se desconoce su naturaleza, origen y mecanismo de producción.

Durante las últimas décadas, costosos satélites se han utilizado para detectar estas partículas, y desde 1999 se están desarrollando diferentes proyectos que estudian los rayos cósmicos desde la superficie terrestre, un ejemplo de esto es el observatorio más grande del mundo: PIERRE AUGER ubicado en Mendoza (Argentina) que ha detectado considerables eventos con energías mayores a 10^{19} eV [15]. Siguiendo este ejemplo, varios países de latino américa, han constituido una unión multinacional bajo el nombre de proyecto LAGO [27], que apunta a detectar fotones de alta energía (destellos de rayos gamma GBR's) con Tanques de agua Cherenkov.

Con el propósito de desarrollar este tipo de investigaciones con detectores de superficie, el Ecuador se ha unido al proyecto con el objetivo de obtener señales sobre eventos cósmicos, y de esta manera aportar a la comunidad científica con datos obtenidos en el centro del planeta.

ANTECEDENTES

Desde del descubrimiento de los rayos cósmicos en 1912, por Victor Hess¹ y posteriores experimentos llevados a cabo por Bothe y Kolhörster, los rayos cósmicos son los fenómenos más notables debido a su comportamiento espectral y la energía con la que arriban a la atmósfera terrestre [26]. En 1938 el físico francés Pierre Auger propuso al observar el arribo simultáneo de partículas a detectores ubicados a cientos de metros entre sí, la existencia de grandes lluvias de partículas, las cuales llevaron a introducir el término de Cascadas Aéreas Extensas EAS², producidas por el paso de las partículas cósmicas a través de la atmósfera [22]. Auger y sus colegas estimaron que la energía de estas partículas primarias, que iniciaban estas lluvias, era aproximadamente de 10^{15} eV.

Debido a las altas energías detectadas se impulsó el desarrollo de nuevos métodos alternativos de detectores de las EAS. Así se construyeron observatorios (Fly's Eye³) basados en la captación de la luz de fluorescencia producida en la atmósfera por la interacción de las partículas de la cascada con las moléculas de N₂. La existencia de estas partículas llevó finalmente a la construcción del Observatorio Pierre Auger [26], el cual tiene como objetivo medir las partículas destellos de rayos gamma, que se producen cada vez que un rayo cósmico choca contra las moléculas de la atmósfera. Así se determina la energía partículas llevó finalmente a la construcción del Observatorio Pierre Auger [26], el cual tiene como objetivo medir, la velocidad, dirección de llegada y la naturaleza de los

¹ Físico Austriaco

² Extensive Air Showers

³ Más detalles del observatorio disponible en <http://www.cosmic-ray.org/>

rayos cósmicos con energías superiores a 10^{18} eV [25]. El observatorio consiste en un arreglo de 1600 detectores de superficie WCD⁴, tanques de detección Cherenkov, que constan de 1200 litro de agua purificada y 3 fotomultiplicadores cada uno, distanciados a 1,5 km entre sí, cubriendo una superficie total de 3000 km².

La comunidad LAGO, Large Aperture Gamma Ray Burst Observatory, ha venido trabajando en colaboración con países latinoamericanos [27] como Argentina, Bolivia, México, Perú, Venezuela, Colombia y Ecuador. El objetivo de la comunidad es: detectar GRB's (destellos de rayos gamma), impulsar el estudio de física de altas energías con detectores Cherenkov de agua diseñados e implementados por cada uno de sus equipos de trabajo, reutilizando y adecuando equipos del Observatorio Pierre Auger. Cada integrante ha adaptado la tecnología disponible a las condiciones ambientales y geográficas propias de cada país con el fin de obtener óptimos resultados de detección. Es así que en Colombia se ha implementado el protocolo de purificación de agua aplicable a la calidad de agua con la que cuentan y se espera que cada país cuente con un tratamiento adecuado para la mejorar la calidad del agua contenida en el tanque.

Ecuador ha ingresado a esta comunidad científica, instalando un prototipo del detector en las inmediaciones de la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, comprometiéndose a instalar posteriormente tres tanques en el primer refugio del volcán Chimborazo a 4879 msnm. Con lo cual se espera desarrollar investigación en el área de la física de partículas y la física Solar.

⁴ Water Cherenkov Detector

JUSTIFICACIÓN

Dada la importancia de usar los datos provenientes de un detector de superficie, es necesario poder cuantificar la señal producida en el mismo ante el paso de las partículas. Estas señales dependen de diversos parámetros asociados tanto a la producción de la luz Cherenkov dentro del agua como a la adquisición específicamente [30]:

- Calidad del agua
- La ganancia de los fotomultiplicadores PTM
- El manejo de las señales por la electrónica del detector.

En este momento, los diferentes grupos de investigación de LAGO trabajan con el fin de indagar sobre la naturaleza de los GRBs [52], que ingresan a nuestro planeta. Por esta razón, es necesario obtener datos de muestreo completamente limpios y sin interferencias del medio de detección, *el agua*.

El desconocimiento de cómo los elementos presentes en el agua utilizada en el tanque, interfieren en la detección de las partículas cósmicas, llevó a proponer una elaboración de un protocolo de agua, que indique el tratamiento óptimo a cumplir, para conseguir una calidad del agua a partir de las propiedades físicas, físico químicas y microbiológicas de modo que concuerde con la teoría de Radiación Cherenkov.

La presente propuesta apunta a la elaboración de un protocolo del agua que será utilizada en el tanque detector Cherenkov WCD, para detectar partículas secundarias remanentes de pequeños chubascos atmosféricos producidos por gammas provenientes de GRBs, permitiéndole a la ESPOCH tener acceso directo a datos de alta calidad científica y con esto ser pionera en Ecuador en la detección de partículas cósmicas.

OBJETIVOS

2.3.1 OBJETIVOS GENERALES

- Elaborar el protocolo del agua para el tanque Cherenkov detector de partículas cósmicas que se enmarca en el proyecto LAGO.

2.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar física, química, fisicoquímica y micro bacteriológicamente las muestras del agua de los deshielos del volcán Chimborazo.
- Diseñar el tratamiento adecuado del agua de los deshielos del Chimborazo para que sea utilizada en el detector de partículas Cherenkov.
- Determinar teóricamente, el número de fotones producidos por electrón y la cantidad de fotones Cherenkov que pueden ser absorbidos por el agua de acuerdo a su longitud de onda.
- Validar la absorbancia del agua.
- Elaborar un plan de manejo del agua del detector.

HIPÓTESIS

El agua de los deshielos del volcán Chimborazo no es apta para ser utilizada como medio detector del rastro de la radiación Cherenkov del tanque detector de partículas.

CAPÍTULO I

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO

1.1 RADIACIÓN CÓSMICA

1.1.1 GENERALIDADES

Una extensa área de la astrofísica de partículas es la radiación cósmica. La clásica radiación cósmica consiste en núcleos ionizados que golpean la Tierra a una velocidad de unos 1000 eventos por centímetro cuadrado en un segundo ($1000/\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) [10]. Estas partículas son consideradas las de mayor energía en el universo, ya que alcanzan energías de hasta más de 10^{20} eV [24]. Para una mejor clasificación se puede dividir el espectro de rayos cósmicos en dos partes: un espectro primario de radiación cósmica y en cascadas y productos secundarios.

a) Espectro Primario

Consiste en aproximadamente 98% de núcleos y un 2% de electrones; los núcleos son aproximadamente 87% protones, 12% partículas alfa y un 1% son un conjunto de elementos pesados con un alto número atómico, hasta $Z^5=28$ (níquel). Esta región de los

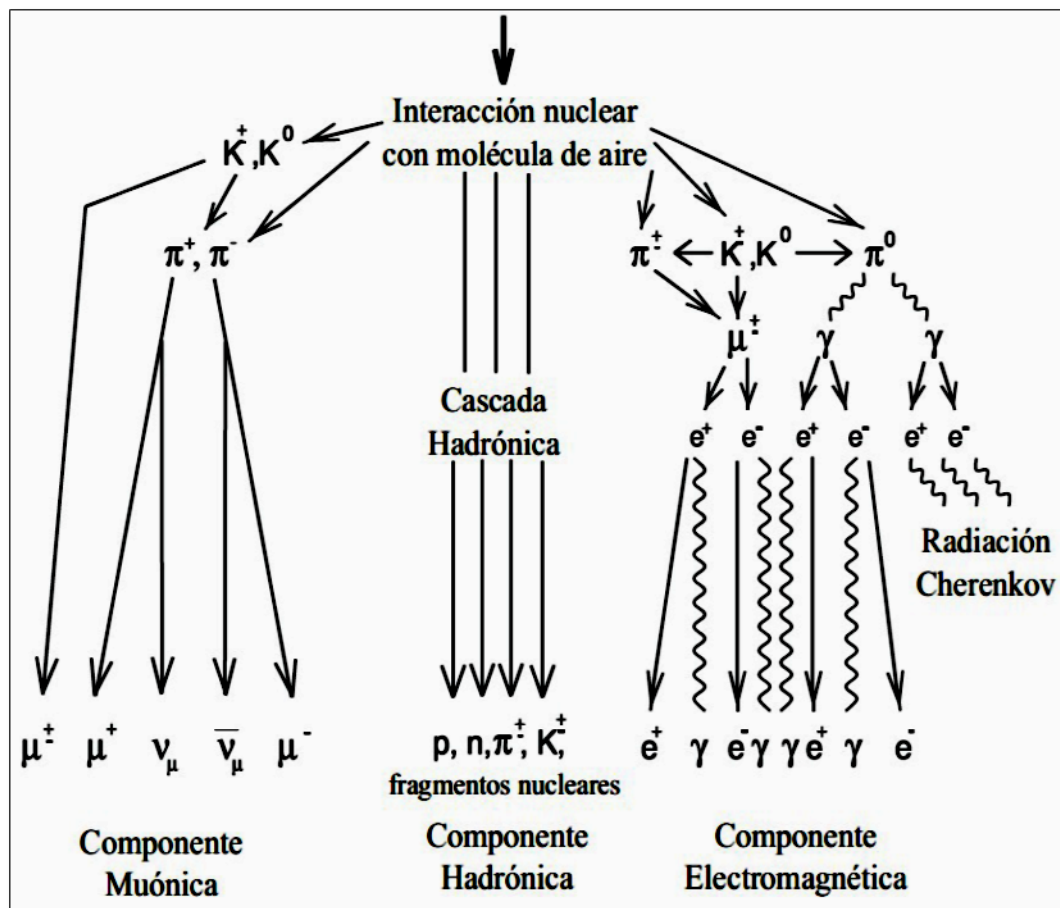
⁵Z: número atómico es el número total de protones en el núcleo del átomo.

rayos cósmicos puede ser medida directamente mediante varios experimentos o telescopios ubicados en la atmósfera terrestre [18].

b) Productos Secundarios y Cascadas

Son el producto de la interacción de los rayos cósmicos primarios con nuestra atmósfera, dicha interacción produce una cascada o lluvia electromagnética [24].

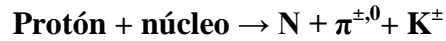
Figura 1-1: Cascada Electromagnética



Fuente: DE LEÓN ARDÓN Rodrigo, Tesis: "Detector Cherenkov de Agua".

Esta lluvia electromagnética posee un flujo de energía muy pequeño, dependiendo de la densidad de la atmósfera, con una energía máxima del orden de los GeV⁶. Una cascada electromagnética de forma general está constituida por tres componentes [27]:

Componente Hadrónica [28]: se inicia a través de interacciones nucleares inelásticas entre protones energéticos y núcleos presentes en el aire. La mayoría de la partículas producidas en la primera interacción son piones, $\pi^{\pm,0}$. Si la energía es lo suficientemente grande, también se producen kaones, K^{\pm} , y pares de barión - antibarión a través del siguiente proceso:



Estas partículas secundarias van interactuando en la atmósfera a medida que llegan a la superficie. Los π^{\pm} y K^{\pm} , son inestables y van decayendo en otras partículas secundarias. Las partículas secundarias producidas en las interacciones son del mismo tipo que las de la primera interacción, aunque con energías más bajas. Estas partículas van interactuando hasta llegar a la superficie. Los π^0 que debido a su tiempo de vida corto, decaen casi inmediatamente en rayos γ , a través de los siguientes procesos:

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma \quad (97,5\%)$$

$$\pi^0 \rightarrow e^+ + e^- + \gamma \quad (1,14\%)$$

⁶GeV: giga-electronvolts= 1×10^9 eV

Los productos de estos decaimientos son las que se conocen como la componente electromagnética.

Componente electromagnética [27]: esta componente está compuesta por fotones, electrones (e^-) y positrones (e^+), iniciada por el decaimiento de mesones, principalmente piones π^0 . Los procesos continuamente transfieren energía de la componente hadrónica a la componente electromagnética y estas se presentan en mayor cantidad al final de la cascada.

Componente muónica [24]: Algunos de los piones π^\pm y Kaones K^\pm cargados decaen antes de poder interaccionar con núcleos de la atmósfera, y la mayoría de ellos decaen en muones μ^\pm y neutrinos ν_μ . Los muones usualmente son generados por procesos de ionización y algunos de ellos alcanzan el suelo antes de decaer. Los muones μ^\pm , son el producto de los siguientes procesos:

$$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu$$

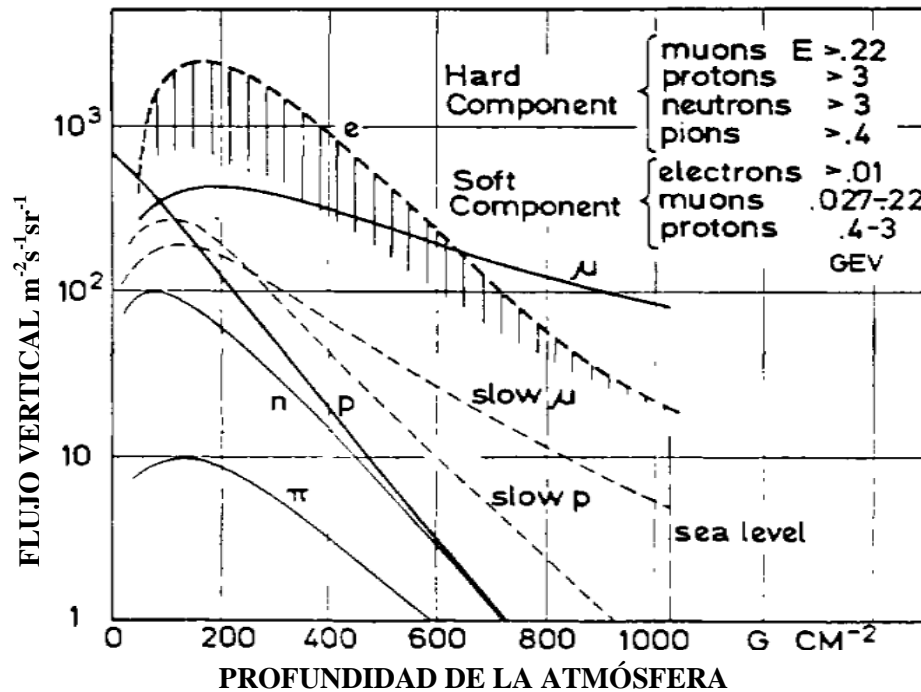
$$K^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu$$

$$K^\pm \rightarrow \pi^\pm + \pi^0$$

$$K^\pm \rightarrow \pi^\pm + \pi^+ + \pi^-$$

$$K^\pm \rightarrow \pi^\pm + \pi^0 + \pi^0$$

Gráfica 1-1: Composición de la radiación secundaria como función de la altura.



Fuente: DE LEÓN ARDÓN Rodrigo, Tesis: "Detector Cherenkov de Agua".

Los principales productos de las cascadas electromagnéticas que pueden ser detectados a nivel del mar, son los de altas energías: electrones, muones, neutrinos y fotones muy energéticos. Los procesos físicos responsables de la cascada electromagnética son:

BREMSSTRAHLUNG: radiación electromagnética que se produce al desacelerar una partícula cargada energética en una distancia corta. Comúnmente esto ocurre cuando una partícula liviana, como un electrón, es desviada por otra carga, tal como un núcleo atómico [2].

CREACIÓN DE PARES [4]: La producción de pares se refiere a la creación de una partícula elemental y su antipartícula a partir de un fotón. Esto es posible siempre y cuando exista suficiente energía para crear el par, por lo menos la energía en reposo de ambas partículas.

Figura 1-2: Creación de Pares

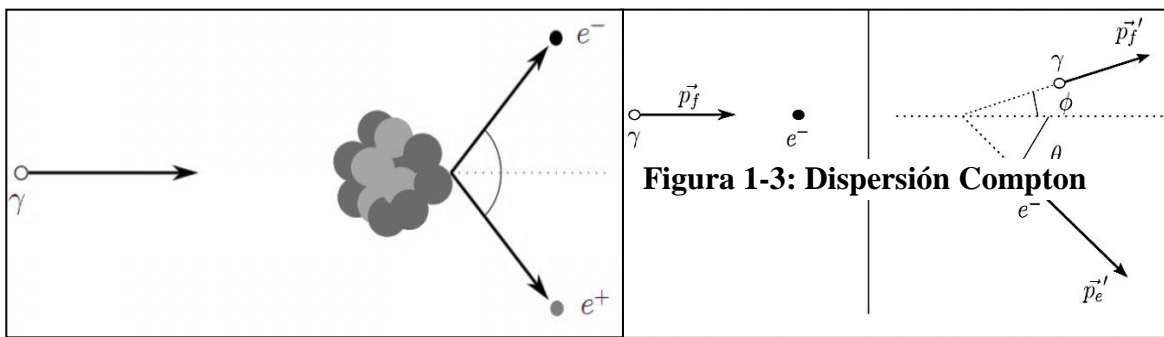


Figura 1-3: Dispersión Compton

DECAIMIENTO DEL MUÓN [54]: El muón (μ^- , μ^+) es un leptón que decae para formar un electrón (e^- , e^+):

Fuente: QUIZPE M. J. Tesis: “Búsqueda de Destellos de Rayos Gamma (GRB’s) en el monte Chacaltaya con detectores de agua Cherenkov”

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

El hecho de que el decaimiento señalado sea uno que involucre a tres partículas hijas se debe a la conservación del número leptónico, deben existir un neutrino electrónico ν_e y

un neutrino muónico ν_μ o antineutrino en el decaimiento ($\overline{\nu}_\mu, \nu_e$). La vida media del muón es de 2,2 μs [14].

Los principales productos de las cascadas electromagnéticas que pueden ser detectados a nivel del mar, son los de altas energías: fotones, muones, neutrinos. Adicionalmente los fotones más energéticos mediante producción de pares, crean electrones (e^-) y positrones (e^+). Los productos secundarios que logran llegar a la superficie de la tierra pueden ser detectados mediante varios métodos, entre los principales tenemos [16]:

- Técnicas Cherenkov
- Observación de partículas en extensas áreas de detección.
- Detección de muones y neutrinos en laboratorios bajo la tierra.

1.1.2 DESTELLOS DE RAYOS GAMMA, GRB'S

Los Gamma Ray Burt's o destellos de rayos gamma, descubiertos por casualidad en el año de 1967 por una serie de satélites Vela encargados de monitorear posibles actividades nucleares prohibidas [28]. Estos fotones gamma son las emisiones más energéticas de radiación cósmica que llegan en períodos de tiempo muy corto del orden de los segundos, que son el resultado de explosiones capaces de brillar como 200000 vías lácteas juntas, en alguna galaxia lejana y según algunos astrónomos son los eventos más violentos posteriores al Big Bang [13].

Los GRBs se clasifican en dos categorías aparentemente distintos: sGRB (destellos cortos) y IGRB (destellos largos) [20]. Los sGRBs típicamente duran menos que dos segundos con una emisión dominante de fotones de alta energía (alrededor de los MeV) y los IGRBs con un tiempo de duración mayor a los dos segundos con una emisión de fotones de baja energía (alrededor de los KeV). La separación de ambas categorías no es absoluta y se han observado suposiciones, que la distinción de ambas regiones sugiere la clasificación de distintos progenitores [26].

Figura 1-4: Explosión Hipernova



Fuente: www.2012quest.com

Existen varias hipótesis alrededor del origen de los GRB's, Algunos astrónomos creen que son causados por un nuevo fenómeno llamado hipernova, cuya intensidad es 100 veces la de una supernova⁷.

Supuestamente, la hipernova se produce cuando los astros más masivos colapsan para formar un agujero negro que rota a gran velocidad, en un proceso que dura de 10 a 20 segundos.

⁷ Estallido de un estrella luego de agotar su combustible nuclear

1.2 RADIACIÓN CHERENKOV

1.2.1 HISTORIA

El primer intento de estudiar la emisión de una luz blanca-azulada muy tenue a partir de sustancias transparentes, cuando ésta se encuentra en presencia de fuentes radiactivas, fue realizado por Mallet⁸ en 1926. El encontró que la luz emitida desde una gran variedad de cuerpos transparentes colocados cerca de una fuente radiactiva siempre tuvo la misma calidad de color blanco azulado, que el espectro era continuo, y que no poseía líneas características de banda de estructura de fluorescencia [9].

En 1934, Cherenkov⁹ comenzó una exhaustiva serie de experimentos, estos experimentos fueron muy importantes debido a la simplicidad y la excelente concordancia entre sus resultados y la teoría propuesta en 1937 por Frank¹⁰ y Tamm¹¹. Determinó que la variación de intensidad era muy pequeña en función del líquido utilizado (baja absorción), y que la distribución espectral variaba muy poco y estaba acumulada en el azul y violeta. Tampoco notó variaciones en la intensidad con la temperatura ni con la acción de agentes amortiguadores de la fluorescencia. Demostró

⁸Mallet , Lucien (1885-1981), médico, físico y radiólogo francés [45].

⁹ Cherenkov, Pavel Alexeievich (1904-1990), físico ruso ganador del premio nobel [45].

¹¹Frank, Ilia Mijáilovich (1908-1990), físico ruso [45].

¹²Tamm, Igor Yevguenievich (1895-1971), físico ruso [45].

que los rayos beta producían el mismo efecto y que los efectos radiantes no eran directamente los rayos gamma o beta al atravesar el líquido sino los electrones disparados por efecto Compton [5]. El siguiente aporte se debió a Ginzburg¹², que en 1940 produjo una teoría cuántica del fenómeno que fue denominado: radiación Cherenkov. En 1947 se dio por parte de Getting la primera propuesta de utilizar un fotomultiplicador y un sistema óptico simple para la detección de partículas individuales por el efecto Cherenkov, luego de varios intentos fallidos, por primera vez en 1951 Jelley, detectó con alta eficiencia partículas rápidas cargadas individualmente, utilizando agua destilada y un fotomultiplicador. Desde 1951 ha habido un aumento constante en el número de aplicaciones prácticas en Física Nuclear y Rayos Cósmicos del contador Cherenkov [9].

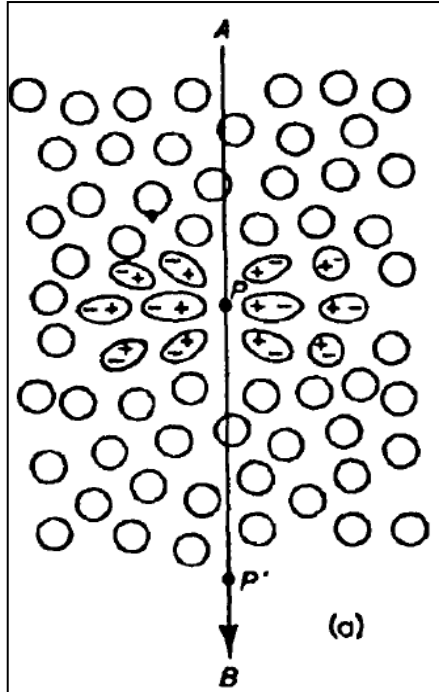
1.2.2 DESCRIPCIÓN DEL EFECTO CHERENKOV

Supongamos que un electrón se mueve lentamente a través de cualquier medio transparente [9]. La figura 1-5, indica la sección vecinal a la trayectoria AB del electrón, en material transparente. Normalmente esta trayectoria debería ser de forma esférica y no distorsionada. Sin embargo en la región cercana al electrón, en el instante P, el campo eléctrico de la partícula distorsiona los átomos del material, haciendo que las cargas negativas de los electrones sean desplazadas hacia el otro lado de las cargas positivas pesadas que los núcleos de los átomos. Por lo tanto el medio se polariza alrededor del punto P. Ahora cuando el electrón se mueve hacia otro punto, llamado P',

¹²Ginzburg, Vitali Lázarevich (1916-2009), físico teórico y astrofísico soviético [55].

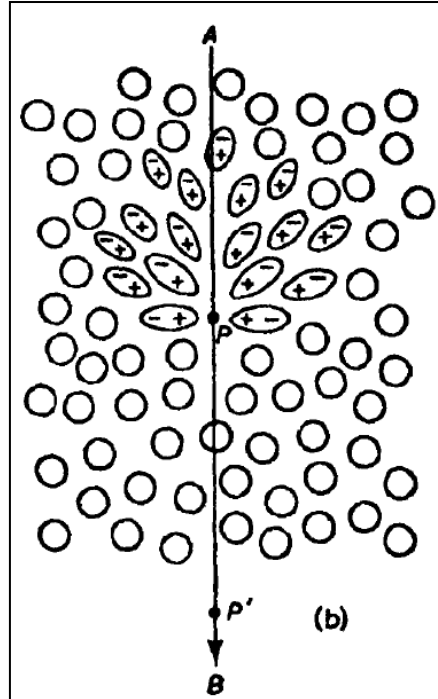
los átomos alargados alrededor de P, regresan a su forma normal. Mientras los átomos se encuentran distorsionados, estos se comportan como dipolos elementales, con los polos negativos apuntando hacia afuera del trayecto de la partícula si es un electrón, o viceversa para un positrón o un protón. Por lo tanto como la partícula pasa a través del medio, cada región del material transparente a lo largo de la trayectoria de la partícula cargada recibirá un muy ligero pulso electromagnético. Debido a la completa simetría del campo polarizado alrededor del electrón, no existirá un campo resultante a grandes distancias, por lo tanto no habrá radiación. En este caso existe asimetría azimutal y a lo largo del eje.

Figura 1-5: Campo Polarizado por un electrón.



Fuente: JELLEY J. Cherenkov Radiation and its application.

Figura 1-6: Trayectoria AB de un electrón viajando a la velocidad de la luz



Fuente: JELLEY J. Cherenkov Radiation and its application.

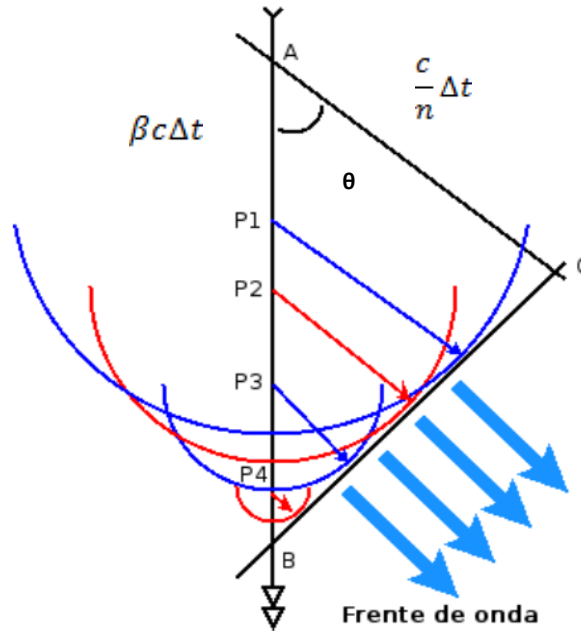
Sin embargo, si el electrón se mueve rápidamente como se ilustra en la figura 1-6, es decir a una velocidad semejante a la de la luz en el medio el campo de polarización ya no es completamente simétrico. En el plano azimutal, la simetría se conserva, pero a lo largo del eje habrá un campo dipolar resultante que será evidente, incluso a gran distancia del rastro del electrón. Este campo electromagnético polarizado, momentáneamente estará establecido por el electrón a lo largo de su trayectoria, luego cada elemento del material irradiará un pulso electromagnético breve. Esta formación y desaparición rápida del momento dipolar es la causa de la emisión de la radiación electromagnética [11].

En general las ondas electromagnéticas de distintos puntos de la traza de la partícula se anulan mutuamente por interferencia, por tanto la intensidad del campo resultante es todavía cero. Sin embargo *si la velocidad de la partícula es mayor que la velocidad de la luz en el medio* [9], es posible que las ondas que se producen en el trayecto de la partícula se encuentren en fase una con otra, reforzando entre sí, entonces ahora si tendremos un campo resultante, que se propaga en un frente de ondas, que se emite con un ángulo característico con relación a la dirección de propagación de la partícula.

1.2.3 CONSTRUCCIÓN DEL FRENTES DE ONDAS

Se puede interpretar el fenómeno con una construcción de frente de onda de Huygens [3]:

Figura 1-7: Frente de Ondas de Huygens



Fuente: http://www.usc.es/labcaf/en/system/files/Det4_Cherenkov.pdf

Consideremos que la partícula está en un tiempo t_0 en la posición A. En un tiempo $t_0 + \Delta t$, la partícula habrá avanzado hasta una posición B recorriendo una distancia [9]:

$$AB = \beta c \Delta t \quad \langle 1.1 \rangle$$

$$\beta = \frac{v}{c} \quad \langle 1.2 \rangle$$

Donde v es la velocidad de la partícula y c es la velocidad de la luz en el vacío. En este mismo período de tiempo, la onda emitida por la partícula en el punto A, habrá recorrido una distancia:

$$AC = \frac{c}{n} \Delta t \quad \langle 1.3 \rangle$$

Donde n , es el índice de refracción del medio. La relación entre el camino recorrido por la partícula y por la radiación será constante en un intervalo Δt , el lugar geométrico donde esta relación se cumple es un frente de ondas. La dirección de propagación de este frente de ondas con la dirección de propagación de la partícula, forman un ángulo θ (**figura 1-7**), que por trigonometría viene descrito por la siguiente expresión, denominada: “**Relación de Cherenkov**” [9]:

$$\cos \theta = \frac{AB}{AC} = \frac{\beta c \Delta t}{\frac{c}{n} \Delta t} = \frac{1}{\beta n} \quad \langle 1.4 \rangle$$

La energía mínima que debe poseer un electrón para inducir la producción de luz Cherenkov viene dada por:

$$E_{min} = \frac{0.511}{\sqrt{(2\delta)}} (MeV) \quad \text{donde} \quad \delta = n - 1 \quad \langle 1.5 \rangle$$

1.2.4 INTERPRETACIÓN TEÓRICA DE LA RADIACIÓN CHERENKOV

Frank y Tamm, propusieron una teoría sobre el problema de radiación proveniente de un electrón moviéndose uniformemente en un medio dieléctrico. Hicieron las siguientes suposiciones [9]:

- El medio es considerado como continuo, entonces la estructura microscópica es ignorada, la constante dieléctrica es el único parámetro usado para describir el comportamiento del medio.
- La dispersión es ignorada.
- Se asume que el medio es un perfecto material dieléctrico isotrópico, entonces la conductividad es cero, la permeabilidad magnética $\mu=1$ y no existe absorción de la radiación.
- Se asume que el electrón se mueve con una velocidad constante.
- El medio es ilimitado y la longitud de la trayectoria de la partícula es ilimitada.

Con las suposiciones anteriores, tomando la relación dinámica entre la polarización P y la intensidad eléctrica E, se tiene:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} + \sum_s w_s^2 P_s = \alpha E \quad \langle 1.6 \rangle$$

Donde w_s son las frecuencias de las oscilaciones moleculares del medio, y $\alpha = Ne^2/m$ (N es el número de electrones con carga e y masa m, por unidad de volumen). E y P se obtienen al ser expandidos en variables de Series de Fourier del tipo:

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} E_w e^{iwt} \cdot dw, \quad P = \int_{-\infty}^{+\infty} P_w e^{iwt} \cdot dw, \quad \langle 1.7 \rangle$$

Es necesario introducir la siguiente conexión ente P y E:

$$P_w = (n^2 - 1)E_w \quad \langle 1.8 \rangle$$

Hay también una conexión entre la intensidad eléctrica E_w y la inducción dieléctrica D_w :

$$D_w = n^2 E_w \quad \langle 1.9 \rangle$$

Las ecuaciones de Maxwell en el medio son las siguientes [8]:

$$\langle 1.10 \rangle \quad \left\{ \begin{array}{ll} \text{div } H_w = 0 & \langle 1.10 \text{ a} \rangle \\ \text{rot } H_w = \frac{1}{c} \left(4\pi j_w + \frac{\partial D_w}{\partial t} \right) & \langle 1.10 \text{ b} \rangle \\ \text{div } D_w = 4\pi & (1.10 \text{ c}) \\ \text{rot } E_w = \frac{1}{c} \frac{\partial H_w}{\partial t} & \langle 1.10 \text{ d} \rangle \end{array} \right.$$

Donde j es la densidad de corriente y p es la densidad de cargas libres. Escribiendo las ecuaciones anteriores como función del vector de potencia A y escalar de potencia ϕ , tenemos lo siguiente [8]:

$$\langle 1.11 \rangle \quad \left\{ \begin{array}{ll} H_w = \text{rot } A_w & \langle 1.11 \text{ a} \rangle \\ \nabla^2 A_w + \frac{w^2 n^2}{c^2} A_w = -\frac{4\pi j_w}{c} & \langle 1.11 \text{ b} \rangle \end{array} \right.$$

$$\langle 1.11 \rangle \quad \left\{ \begin{array}{ll} \nabla^2 \phi_w + \frac{w^2 n^2}{c^2} \phi_w = -\frac{4\pi}{n^2} p & \langle 1.11 \text{ c} \rangle \\ E_w = -\frac{1}{c} \frac{\partial A_w}{\partial t} - grad \phi_w & \langle 1.11 \text{ d} \rangle \end{array} \right.$$

Donde se ha hecho uso de la conexión entre el vector y el potencial escalar [8]:

$$\text{div } A_w - \frac{iw}{c} n^2 \phi_w = 0 \quad \langle 1.12 \rangle$$

Si un electrón con carga e , se encuentra moviéndose a lo largo del eje x , con una velocidad constante v , la correspondiente densidad de corriente j , esta dada por:

$$j_z = ev \delta(x) \delta(y) \delta(z - vt), \quad \langle 1.13 \rangle$$

Donde δ denota la función de Dirac. La componente j_z y j_u son cero para este caso.

Expandiendo la ecuación anterior tenemos:

$$j_z(w) = \frac{e}{2\pi} e^{-iuz/v} \delta(x) \delta(y) \quad \langle 1.14 \rangle$$

Introduciendo las coordenadas cilíndricas ρ , ϕ y z :

$$j_z(w) = \frac{e}{4\pi^2 \rho} e^{-iuz/v} \delta(\rho) \quad \langle 1.15 \rangle$$

Insertando esta expresión en **1.11 b** y tomando en cuenta que: $A_p = A_\phi = 0$ y $A_z(w) = u(\rho)e^{-iuz/v}$, tenemos la siguiente expresión:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial u}{\partial \rho} + s^2 u = \frac{e}{\pi c \rho} \delta(\rho) \quad \langle 1.16 \rangle$$

Donde:

$$s^2 = \frac{w^2}{v^2} (\beta^2 n^2 - 1) = -\sigma^2 \quad \langle 1.17 \rangle$$

Así u es una función cilíndrica que satisface la ecuación de Bessel:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial u}{\partial \rho} + s^2 u = 0 \quad \langle 1.18 \rangle$$

En todos los casos a excepción de cuando $\rho = 0$. Para encontrar la condición que sea satisfecha por u y $\rho = 0$, primero se remplazará el lado derecho de la ecuación **1.16** por f :

$$f = -\frac{2e}{\pi c \rho_0}, \text{ si } \rho < \rho_0 \text{ y } f = 0, \text{ si } \rho > \rho_0 \quad \langle 1.20 \rangle$$

Integrando **1.16**, sobre la superficie del disco de radio ρ_0 y por último ir al límite donde:

$\rho \rightarrow \rho_0$. En este caso obtenemos:

$$\lim_{\rho \rightarrow 0} \rho \frac{\partial u}{\partial \rho} = \frac{e}{\pi c} \quad \langle 1.21 \rangle$$

Para altas velocidades, determinada por $\beta n > 1$, el parámetro s en **1.17**, es real y la solución general para las ecuaciones **1.16** y **1.18** representan en el infinito una onda cilíndrica. Así, si $\beta n > 1$, una onda propagada en el infinito, a lo largo de la dirección θ . El vector eléctrico de la onda descansa en el plano meridiano (z, ρ).

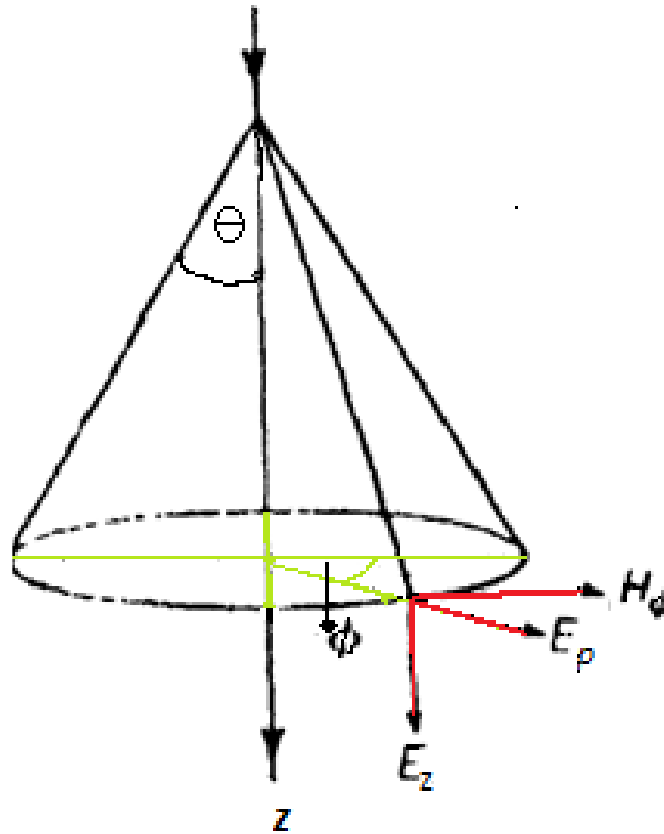
Calculando la intensidad del campo en la zona de la onda con la ayuda de las ecuaciones de Maxwell 1 y 2, existen solamente 3 campos vectoriales que no se desvanecen [8]:

$$\left. \begin{aligned} H_{\phi} &= -\frac{a}{\sqrt{(\rho)}} \int \sqrt{(s)} \cdot \cos X \cdot dw \\ E_{\rho} &= -\frac{a}{\sqrt{(\rho)}} \int \frac{\sqrt{\beta^2 n^2 - 1}}{\beta^2 n^2 \sqrt{(s)}} \cdot \cos X \cdot w dw \\ E_z &= \frac{a}{c\sqrt{(\rho)}} \int \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{(s)}} \cos X \cdot w dw \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{VECTORES DE} \\ \text{POLARIZACIÓN} \\ \\ \langle \mathbf{1.22} \rangle \end{array}$$

Donde: $\alpha = \frac{e}{c} \sqrt{\frac{2}{\pi}}$ y $X = w \left[t - \frac{z \cos \theta + \rho \sin \theta}{c/n} \right] + \frac{\pi}{4}$ **(1.23)**

La integración de los vectores de polarización se debe llevar a cabo solamente con valores de w los cuales cumplan $\beta n(w) \geq 1$.

Figura 1-8: Formación del cono Cherenkov y sus vectores de polarización



Fuente: JELLEY J. Cherenkov Radiation and its application.

El total de energía irradiada por el electrón a través de la superficie del cilindro de longitud l , cuyo eje coincide con la línea de rastro del electrón, es igual a:

$$W = 2\pi\rho l \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{c}{4\pi} [EH] dt \quad \langle 1.24 \rangle$$

Con la ayuda de la fórmula:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \cos(wt + a) \cos(w't + \beta) dt = \pi \delta(w - w') \quad \langle 1.25 \rangle$$

Llegamos a la **Ecuación Fundamental para la Radiación de Salida** [9]:

$$\frac{dW}{dl} = \frac{e^2}{c^2} \int_{\beta n > 1} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) w dw \quad (1.26)$$

Ya que la frecuencia de corte no se ha impuesto en la obtención de la ecuación fundamental, la radiación de salida, es infinita. En la práctica, sin embargo, existen dos factores los cuales establecen un límite superior de la frecuencia del espectro y causan que el campo de la radiación sea finito [9]:

1. Un medio real es siempre dispersivo, entonces esta radiación está restringida hacia bandas de frecuencia con $n(w) > 1/\beta$. Las bandas de absorción en un medio, el cual es transparente a las longitudes de onda en visible, sirven para limitar las radiaciones cercanas al ultravioleta y longitudes de onda más grandes. Inclusive puede haber restricciones en la absorción del infrarrojo.
2. El segundo factor que limita el espectro, es el tamaño finito del electrón. La radiación del electrón debe ser limitada por las longitudes de onda, las cuales son mayores que el diámetro clásico del electrón d .

Frecuentemente es más usual expresar la intensidad de la radiación en términos del número de fotones. La teoría de Frank y Tamm deja la siguiente expresión para el número de fotones con longitud de onda entre λ_1 y λ_2 , creados en el trayecto de una

partícula de velocidad βc , por centímetro de camino recorrido, moviéndose en un medio con índice de refracción n es [14]:

$$\frac{dN}{dx} = 2\pi\alpha \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right) \quad (1.27)$$

Sabemos que $\frac{1}{\beta n} = \cos\theta$, entonces:

$$N = 2\pi\alpha l \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right) \sin^2 \theta \quad (1.28)$$

Donde α [46] es la constante de estructura fina de Sommerfeld $= \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}$, es una constante física fundamental¹³ que caracteriza la fuerza de la interacción electromagnética. En la teoría de electrodinámica cuántica la constante de estructura fina juega el rol de una constante de acoplamiento, representando la fuerza de la interacción entre electrones y fotones y n es el promedio del índice de refracción del medio.

Si consideramos para un ejemplo un electrón de 500 KeV moviéndose en una profundidad de 1mm de agua. Si tomamos la región del espectro visible, que se encuentran en un rango de longitud de onda desde 4000 hasta 6000 Å, aproximadamente

¹³Una constante física fundamental es una constante física adimensional y que por tanto toma el mismo valor en cualquier sistema de unidades.

10 fotones serán emitidos por un electrón individual de esta energía, para el cual $\beta^2=0.75$, tomando $n=1.33$ [9].

1.2.5 CAMPO DE RADIACIÓN Y DISTRIBUCIÓN ESPECTRAL [9]

Se puede calcular el orden de magnitud del campo de radiación. El valor aproximado de $n^2(w)$ puede ser escrito en la siguiente forma:

$$n^2(w) = 1 + \left(\frac{A}{w_0^2}\right), n^2(0) = \epsilon = 1 + \left(\frac{A}{w_0^2}\right) \quad (1.29)$$

Donde w_0 es la frecuencia de la primera resonancia en el espectro. Substituyendo **1.28** en la ecuación **1.29**, se obtiene la siguiente ecuación aproximada de pérdida de energía por unidad de camino, para un electrón rápido ($\beta \sim 1$), por radiación Cherenkov:

$$\frac{dW}{dl} = \frac{e^2 w_0^2}{2 c^2} (\epsilon - 1) \ln\left(\frac{\epsilon}{\epsilon - 1}\right) \quad (1.30)$$

En un medio $w_0 = 6 \times 10^{15} / \text{sec}$ típico, entonces (dW/dl) es del orden de varios KeV por cm o $\sim 0.1\%$ de la energía perdida por ionización para una partícula relativista.

La distribución espectral puede ser expresada de varias maneras. Dado que la intensidad de luz con una frecuencia $\nu = (w/2\pi)$, puede ser escrita como $W=N.h\nu$, donde h es la

constante de Planck, la distribución puede ser escrita en cualquiera de las siguientes cuatro formas [8]:

$$\langle 1.31 \rangle \left\{ \begin{array}{ll} \left(\frac{d^2 W}{dl dw} \right) \propto w & \text{Energía por unidad de camino recorrido por unidad de} \\ & \text{intervalo de frecuencia.} \\ \left(\frac{d^2 W}{dl d\lambda} \right) \propto \frac{1}{\lambda^3} & \text{Energía por unidad de camino recorrido por unidad} \\ & \text{de intervalo de longitud de onda.} \\ \left(\frac{d^2 N}{dl dw} \right) \propto \text{const} & \text{Número de fotones por unidad de camino recorrido por} \\ & \text{unidad de intervalo de frecuencia.} \\ \left(\frac{d^2 N}{dl d\lambda} \right) \propto \frac{1}{\lambda^2} & \text{Número de fotones por unidad de camino recorrido por} \\ & \text{unidad de intervalo de longitud de onda.} \end{array} \right.$$

1.2.6 DURACIÓN DEL DESTELLO DE LUZ

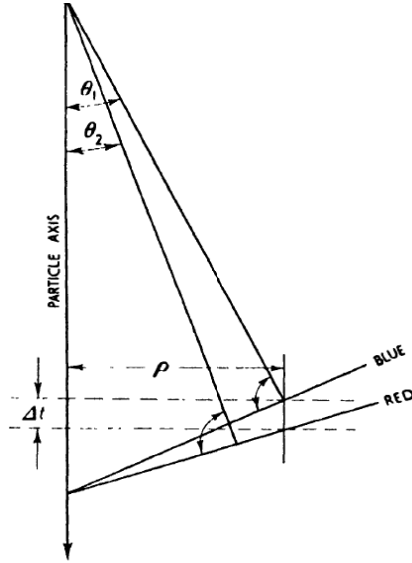
Dado que en un medio dispersivo, el frente de ondas es infinitamente delgado, la duración del pulso de luz en cualquier punto dentro del cono Cherenkov es infinitamente corto. Sin embargo si un medio es dispersivo, el ángulo Cherenkov θ , es diferente para las diferentes longitudes de onda y el tren de ondas se dispersará uno de otro [9]. El intervalo Δt del pulso de luz observado a lo largo de la línea paralela al eje de la partícula, a una distancia ρ desde el eje, estará dado por:

$$\Delta t = \frac{\rho}{\beta c} \left\{ \left[\sqrt{\beta^2 n^2 (w_2) - 1} \right] - \left[\sqrt{\beta^2 n^2 (w_1) - 1} \right] \right\}$$

$$\Delta t = \frac{\rho}{\beta c} (\tan \theta_2 - \tan \theta_1) \quad (1.32)$$

Donde w_2 y w_1 son las frecuencias límites del receptor de luz y θ_2 y θ_1 son los correspondientes ángulos Cherenkov.

Figura 1-9: Ángulo Cherenkov (θ), de acuerdo a la longitud de onda.



Fuente: JELLEY J. Cherenkov Radiation and its application.

Como un ejemplo, podemos considerar un destello de luz observado a una distancia de 10 cm desde el rastro dejado por un electrón rápido en el agua, ($\beta=1$, $n=1.33$ y $\theta=41^\circ$). Aplicando la ecuación anterior entre las longitudes de onda vistas $\lambda=4000$ y 6000\AA , tenemos que $\Delta t=5 \times 10^{-12}$ seg.

1.2.7 MODIFICACIONES INTRODUCIDAS POR LA TEORÍA CUÁNTICA.

En la teoría clásica de radiación Cherenkov presentada, los efectos debido a la reacción de emisión de radiación durante el movimiento de la partícula han sido ignorados. Cuando estos efectos son tomados en cuenta, las expresiones para una condición de radiación y producción de energía tienen una forma que difiere ligeramente con la teoría original. Las modificaciones son pequeñas debido a que la energía irradiada cuantificada es pequeña en comparación con la energía cinética de la partícula [9].

Se tomarán en cuenta la conservación del momento y energía, para ello tenemos que una partícula en reposo de masa m se encuentra viajando a través de un medio con una velocidad constante u . También se asume que en alguna etapa del camino de la partícula esta emite un fotón con energía $h\nu$ en un ángulo θ con respecto a la dirección de la partícula. Instantáneamente la partícula experimentará una pérdida de energía, entonces ahora viaja a una velocidad de v con algún ángulo ϕ con respecto a la dirección original [9]. La conservación del momento nos lleva a la ecuación:

$$mv \left(1 - v^2/c^2 \right)^{-1/2} \cos \phi + \frac{h}{\lambda} \cos \theta = mu(1 - u^2/c^2)^{-1/2} \quad (1.33)$$

$$\text{Y } mv \left(1 - v^2/c^2 \right)^{-1/2} \sin \phi - \frac{h}{\lambda} \sin \theta = 0, \quad (1.34)$$

Mientras que la conservación de la energía no lleva a esta ecuación:

$$mc^2 \left(1 - u^2/c^2\right)^{-\frac{1}{2}} = mc^2 (1 - v^2/c^2)^{-\frac{1}{2}} + h\nu \quad \langle 1.35 \rangle$$

Eliminando ϕ y ν y reemplazando $\nu=c/n\lambda$, donde n es el índice de refracción del medio, obtenemos:

$$\cos \theta = -\frac{c}{nu} + h \left(1 - u^2/c^2\right)^{1/2} (n^2 - 1)/2mun^2 \lambda \quad \langle 1.36 \rangle$$

Esta expresión a su vez puede ser escrita como: $\cos \theta = -\frac{1}{\beta n} + \left(\frac{\Lambda}{\lambda}\right) \left(\frac{n^2-1}{2n^2}\right) \quad \langle 1.37 \rangle$

$$\Lambda = h \frac{\sqrt{1-\beta^2}}{mu} = \frac{\sqrt{1-\beta^2}}{\beta} \lambda_0 \quad \langle 1.38 \rangle$$

Donde λ_0 , es la longitud de onda Compton = 0.024 Å. La validez de esta expresión se sustenta en que el momento del fotón en el medio es $h\nu n/c$ y no $h\nu/c$.

Con la condición **1.36**, usamos la ecuación de Schrödinger para obtener la expresión de radiación de salida para una carga e , la cual se asume que no tiene momento magnético [8]:

$$\frac{dW}{dl} = \frac{e^2}{c^2} \int \left\{ 1 - \frac{1}{\beta^2 n^2(w)} \left[1 + \frac{n^4}{4} \left(\frac{\hbar w}{mc^2} \right)^2 + n^2 \left(\frac{\hbar w}{mc^2} \right) \right] \right\} w dw \quad \langle 1.39 \rangle$$

Ahora bien, si se extiende la expresión para un electrón no relativista y si se toma en cuenta el momento magnético μ_o , el cual se encuentra polarizado a lo largo del eje de movimiento. El campo de radiación ahora contiene dos términos, el primero pertenece a la carga y es igual a **1.39**, el segundo pertenece al momento magnético, y tiene la siguiente forma [9]:

$$\left(\frac{dW}{dl} \right)_{\mu_s} = \frac{\mu_o^2}{\beta^2 c^4} \int n^2(w) w^3 \left\{ 1 - \frac{1}{\beta^2 n^2(w)} \left[1 + \frac{n^4}{4} \left(\frac{\hbar w}{mc^2} \right)^2 + n^2 \left(\frac{\hbar w}{mc^2} \right) \right] \right\} dw \quad \langle 1.40 \rangle$$

Debe existir un término adicional proveniente de las transiciones en las cuales el spin se ve afectado por la a reversa que sufre el momento dipolar durante el paso del electrón a través del medio. Sokolov y Loskutov (1957), mostraron que si la partícula posee spin, la polarización, la condición umbral y el campo de radiación son ligeramente modificados [9].

La radiación total expresada en unidades de energía por unidad de longitud de camino, debe ser escrito como la suma de los números de componentes separados $W \left(\begin{smallmatrix} s \\ j \end{smallmatrix} \right)$, donde el índice s, se refiere al spin ($s=1/2,0$) y j se refiere a los diferentes tipos de polarización ($j=2, 3,+1,-1$). El sistema coordinado para definir estas polarizaciones es el siguiente: $j=3$, correspondiente al fotón lineal polarizado en el plano que contiene al fotón y a la

partícula (con el eje perpendicular a la dirección de movimiento del fotón), $j=2$ corresponde al caso ortogonal, y $j= \pm 1$ corresponde a los dos casos de polarización circular. Sabiendo esto, la radiación Cherenkov normal en el caso de que la partícula no tenga spin puede ser escrita como [9]:

$$W\binom{0}{2}=0, \quad \langle 1.41 \rangle$$

$$W\binom{0}{3} = \frac{s^2}{c^2} \int_0^{w_{max}} w(1 - \cos^2 \theta) dw \quad \langle 1.42 \rangle$$

Pero para una radiación de partículas con spin un medio, tenemos una contribución adicional, de la forma:

$$W\binom{1/2}{2} = \frac{s^2}{c^2} \int_0^{w_{max}} w \left[\frac{n^2 w^2 \hbar^2}{4c^2 p^2} \right] \left(1 - \frac{1}{n^2} \right) dw \quad \langle 1.43 \rangle$$

El campo total queda de la siguiente forma:

$$W\binom{1/2}{2} = W\binom{0}{3} + W\binom{1/2}{2}, \text{ Con la condición adicional: } W\binom{1/2}{-1} = W\binom{1/2}{+1} \quad \langle 1.44 \rangle$$

La ecuación **1.39** es un efecto cuántico, y si tenemos que $\hbar \rightarrow 0$ (aproximación clásica), la radiación para partículas sin spin, volverá nuevamente a ser completamente a una polarización lineal. El efecto del spin deja una contribución para la radiación la cual no desaparece con el umbral de energía ($E=E_0$), mientras que la porción de radiación

linealmente polarizada se desvanece en el umbral, e incrementa ligeramente cuando se encuentra por encima del umbral $(E - E_0)/E_0 \ll 1$, para [9]:

$$W_3^{(0)} = 2 \frac{e^2}{c^2} \left(\frac{E - E_0}{mc^2} \right) \int_0^{w_{max}} n^2 w dw \quad (1.45)$$

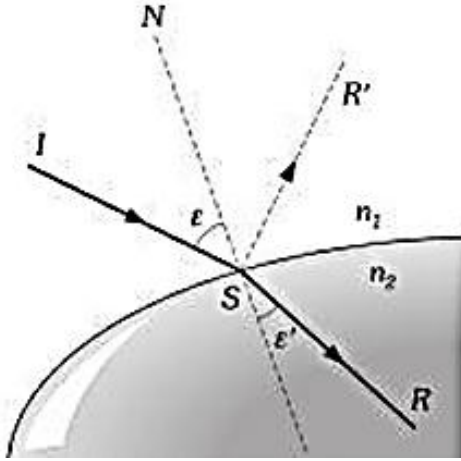
1.2.9 CONSIDERACIONES PRÁCTICAS DEL MEDIO

El medio ideal para un detector Cherenkov, debe ser aquel que tenga un alto índice de refracción, baja absorción de luz, baja densidad, bajo número atómico, y una baja dispersión. Por desgracia los requisitos no son compatibles entre sí y es necesario hacer concesiones. Por ejemplo, el índice de refracción alto, deseable para un alto rendimiento de la luz, se suele asociar con una dispersión alta, lo que resulta en una baja transmisión, particularmente en longitudes de onda corta [9]. De manera similar, materiales de baja densidad y número atómico bajo, los cuales son importantes para una pérdida de energía mínima y baja dispersión, están generalmente asociados con índices de reflexión bajos.

a) ÍNDICE DE REFRACCIÓN DE LA LUZ

La refracción es el cambio de velocidad que experimenta la luz al pasar de un medio a otro. Este cambio de velocidad se manifiesta por una variación de la dirección de propagación, en todos los casos, excepto cuando el rayo incidente es normal a la superficie de separación de los medios.

Figura 1-10: Angulo de incidencia ϵ y de Refracción ϵ'



Fuente: BURBANO S., BURBANO E.
Física General

Ángulo de incidencia ϵ y de Refracción ϵ' , son los formados por el *Rayo Incidente I* y *Refractado R*, con la *Normal N* a la superficie en el *Punto de Incidencia S* [3].

La luz viaja en diferentes medios materiales con distinta velocidad v , siempre menor que la que lo hace en el vacío c [4]. Ópticamente se caracterizan los medios transparentes por un escalar n que se define como: $n = \frac{c}{v}$.

Las refringencias¹⁴, son inversamente proporcionales a las velocidades de la luz en los distintos medios. Como índice de refracción se toma, siempre, el de la sustancia más refringente con respecto a la menos refringente.

Tabla 1-1: ÍNDICE DE REFRACCIÓN DE ALGUNOS MEDIOS (20°C)

MEDIO	ÍNDICE DE REFRACCIÓN n	DISPERSIÓN RELATIVA V
Aire	1.000293	
Metano	1.000444	
Cloro	1.000773	
Fluoroquímico FC 75	1.276	
Etanol	1.3645	
Agua	1.3369	56
Hielo	1.309	

¹⁴Capacidad para refractar la luz

Paraldehido	1.405	
Glicerol	1.47	
Parafina Líquida	1.48	
Clorobenzeno	1.525	30.6
Quinolina	1.627	20
Lucita (pexiglás)	1.49	
Diamante	2.417	

Fuente: ORDUZ SÁNCHEZ J., Tesis: Determinación del índice de Refracción de la luz en agua pura y del medicamento homeopático NatrumMuriaticum (Cloruro de Sodio) en varias diluciones CH 7, 9, 15, 30, a 25 grados centígrados, succionadas y sin succionar.

b) ABSORCIÓN DE LA LUZ [31]

Nivel microscópico: A nivel de los fotones (cuantos de luz), la absorción es el fenómeno por el cual la energía de un fotón es tomada por otra partícula, como por ejemplo, un átomo cuyos electrones de valencia efectúan una transición entre dos niveles de energía electrónica. El fotón resulta entonces destruido en la operación, la energía electromagnética es absorbida y convertida en energía electrónica. Esta energía absorbida se puede volver a transformar en:

- Energía electromagnética por emisión de fotones.
- Convertida en la agitación de la partícula (mayor velocidad de la partícula) lo que se traduce a nivel macroscópico en un aumento de la temperatura (energía electromagnética que se transforma en calor).
- En un fonón¹⁵

¹⁵Fonón es cuasipartícula o modo cuantizado vibratorio que tiene lugar en redes cristalinas como en la red atómica de un sólido[51]

- En un plasmón¹⁶

Nivel macroscópico: En términos del electromagnetismo clásico, la absorción es el fenómeno por el cual los materiales no transparentes, atenúan cualquier onda electromagnética que pasa por ellos, la energía absorbida se convierte en calor (efecto Joule) [32].

Aspecto práctico: Para la mayoría de las sustancias, la tasa de absorción varía con la longitud de onda de la luz incidente, lo que lleva a la aparición del color en los pigmentos que absorben ciertas longitudes de onda, pero no para otras. Por ejemplo, con la luz blanca incidente, un objeto que absorbe las longitudes de onda en el azul, verde y amarillo, aparecerá en rojo. Un material negro absorbe todas las longitudes de onda (convertidas en calor, mientras que un material blanco las reflejará) [32].

c) DISPERSIÓN DE LA LUZ

Se denomina dispersión al fenómeno de separación de las ondas de distinta frecuencia al atravesar un material [40]. La dispersión de la luz es un fenómeno que se produce cuando un rayo de luz blanca atraviesa un medio transparente y se refracta, mostrando a la salida de éste los respectivos colores que la constituyen. La dispersión tiene su origen en una disminución en la velocidad de propagación de la luz cuando atraviesa el medio. Debido a que el material absorbe y reemite la luz cuya frecuencia es cercana a la

¹⁶Plasmón es un cuanto de oscilación del plasma. [51]

frecuencia de oscilación natural de los electrones que están presentes en él, ésta luz se propaga un poco más despacio en comparación a luz de frecuencias distintas. Estas variaciones en la velocidad de propagación dependen del índice de refracción del material y hacen que la luz, para frecuencias diferentes, se refracte de manera diferente [40].

1.3 DETECTOR CHERENKOV DE AGUA (WCD)

1.3.1. GENERALIDADES

Este detector de radiación está basado en la luz que es emitida por una *partícula cargada* lo suficientemente rápida que pasa a través de un medio óptico transparente con un índice de refracción mayor que 1. La luz es emitida cada vez que *la velocidad de la partícula cargada sobrepasa la velocidad de luz en el medio atravesado* [11].

$$\beta n > 1; \quad (1.46)$$

$$\left(\frac{\text{velocidad partícula en el medio}}{\text{velocidad luz en el medio}} \right) > 1$$

Donde n es el índice de refracción en el medio y β es la proporción entre la velocidad de la partícula en el medio y la velocidad de la luz en el vacío. Los detectores sensibles a la luz Cherenkov son ampliamente usados en experimentos de alta energía pero tienen un uso limitado para la radiación de baja energía. Para partículas en el rango de decenas

de MeV o menos, los electrones son la única categoría que alcanzan la suficiente alta velocidad para emitir luz Cherenkov en el material disponible. Por lo tanto las aplicaciones involucran cualquier electrón primario rápido como son las partículas beta o electrones energéticos secundarios producidos en interacciones de rayos gamma [11].

1.3.2 PROPIEDADES DE LOS DETECTORES CHERENKOV [11]

- Se requiere una partícula con una velocidad mínima en un medio dado, para generar luz Cherenkov. Por lo tanto, los detectores Cherenkov tienen una habilidad de discriminación inherente, que es única entre los distintos tipos de detectores. Su responsabilidad está limitada a los electrones cuya energía excede un mínimo o un umbral dado por :

$$E_u = m_0 c^2 \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{1}{n^2 - 1}} \right) \quad \langle 1.47 \rangle$$

Donde, $m_0 c^2$ representa la energía de reposo del electrón (0.511 MeV). Se pueden hacer detectores Cherenkov “ciegos” a partículas lentas y, por tanto, vetar sucesos sin interés físico: trigger¹⁷.

- La luz es emitida en muy pequeños tiempos requeridos para que el electrón desacelere desde su velocidad inicial hasta por debajo de la velocidad umbral.

¹⁷Procedimiento que se ejecuta cuando se cumple una condición establecida al realizar una operación.

Este tiempo típicamente puede ser en el orden de los pico segundos en sólidos o en líquidos, entonces los detectores Cherenkov tienen una ventaja al ser excepcionalmente rápidos. Es el tubo fotomultiplicador el que limita los rangos del tiempo.

- Los fotones Cherenkov son emitidos preferencialmente a lo largo de la dirección de la velocidad de la partícula. La luz es confinada en la superficie de un cono con un ángulo θ , donde $\cos\theta = \frac{1}{\beta n}$
- El campo de fotones Cherenkov por unidad de longitud de onda λ , es proporcional a $1/\lambda^2$. La emisión es sin embargo concentrado en una región del espectro de longitud de onda corta.

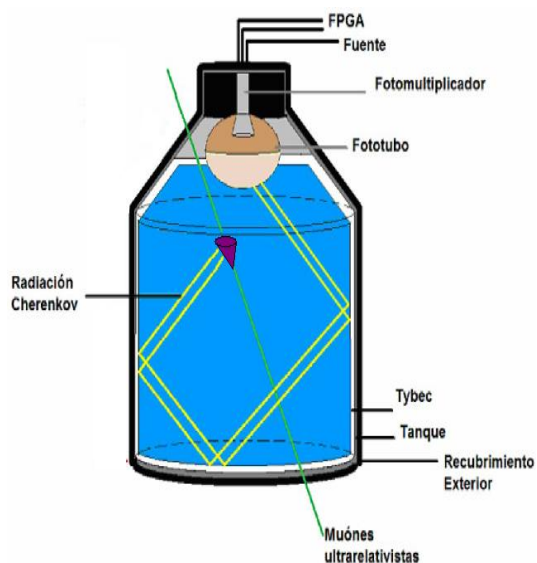
1.3.3 DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO DEL TANQUE DETECTORCHERENKOV DE AGUA (ESPOCH)

FOTO 1-1: Prototipo Tanque ESPOCH “Chimbita”



Fuente: Tesista

FIGURA 1-11: Estructura del Prototipo Tanque ESPOCH.



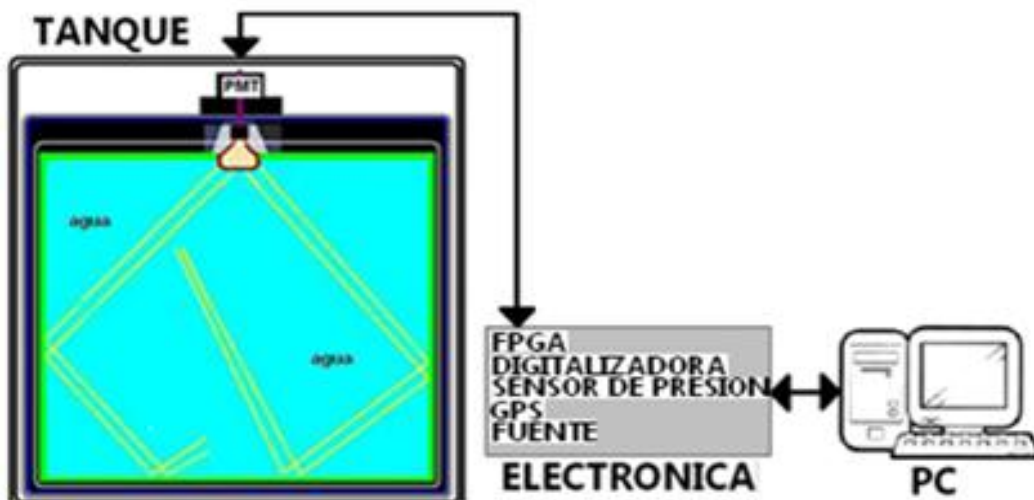
Fuente: QUISPE MAMANI J., Tesis:
Caracterización de Detectores Cherenkov en el
proyecto LAGO

El prototipo del detector Cherenkov de agua se encuentra ubicado en las inmediaciones de la ESPOCH junto a la Escuela de Física y Matemática, <Chimbita>, está hecho de polietileno, es un tanque cilíndrico de 169 centímetros de altura y 56 centímetros de radio, tiene una capacidad de 1100 litros de agua. Fue protegido por una cubierta que evita el ingreso de luz externa.

La luz Cherenkov producida por el pasaje de partículas relativistas por el tanque es reflejada por el Tyvek y captada por un fotomultiplicador de 9 pulgadas, colocado en el

centro del tanque en la parte superior, acoplado al Tyvek lo mejor posible para minimizar las pérdidas de luz Cherenkov. La señal que se genera es digitalizada por una electrónica local y los datos son enviados a una PC.

Figura 1-12: Esquema de Detección



Fuente: PÉREZ Yuniór Br., Tesis: “Caracterización de Detectores Cherenkov en el Proyecto LAGO.”

1.3.4 ELECTRÓNICA

La electrónica del Tanque Cherenkov consta de:

Fotomultiplicador (PMT) [22]: Es un dispositivo extremadamente sensible a la luz, usualmente en azul y ultravioleta. El PMT es un tubo

Figura 1-13: Fotomultiplicador



Fuente: <http://gomollon.com/cpobes/2012/06/27/como-functiona-icecube-i-los-modulos-opticos-doms/>

de vidrio al vacío que contiene un fotocátodo, varios dinodos, y un ánodo. La incidencia de fotones en el fotocátodo produce fotoelectrones por el efecto fotoeléctrico. El alto voltaje entre cada dinodo provoca una avalancha secundaria de electrones, literalmente multiplicando la señal. Típicamente se detectan en el ánodo 106 millones de electrones de un fotón que golpea el fotocátodo.

Tarjeta Digitalizadora [22]: Es una placa que digitaliza los pulsos provenientes del ánodo de la base del fotomultiplicador, para posteriormente ser tratados por una FPGA (Field Programmable Gate Array) NEXIS2 y transferir los datos al PC.

Foto 1-2: Tarjeta Digitalizadora



Fuente: Tesista

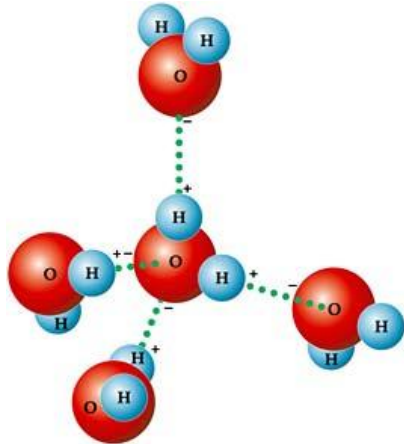
Computador [22]: La PC debe cumplir los siguientes requerimientos para poder albergar el software que será utilizada para la adquisición, consultas, control, entre otras opciones para el manejo del detector.

- Tener instalado UBUNTU
- Instalar las librerías DIGILENT necesarios para que trabaje la FPGA
- Compilador de C
- Programas de edición de text (Gedit O Vim), y para graficar como GNUPLOT
- finalmente instalar el software LAGO.

1.4 AGUA

1.4.1 GENERALIDADES DEL AGUA

Figura 1-14: Molécula Agua



Fuente:
<http://jorgecnc.blogspot.com/p/3-el-origen-de-la-vida.html>

En 1804, el químico francés Joseph Gay-Lussac y Alexander von Humbolt descubrieron que el agua tenía dos volúmenes de hidrógeno y un volumen de oxígeno [33]. La molécula de agua está conformada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno (H₂O), con dos planos simétricos y 2 ejes de

rotación doblados. La molécula toma una conformación espacial de un tetraedro, formando un ángulo entre los

dos enlaces de 104.45°, del átomo del oxígeno, el cual produce una carga negativa en el vértice (átomo de oxígeno), y positivamente en los átomos de hidrógeno.

La molécula de agua tiene una carga neutra (igual número de protones y de electrones), presentando una distribución asimétrica de los electrones, llamándose una sustancia polar, esto quiere decir que alrededor del oxígeno presenta una carga negativa, mientras que los hidrógenos quedan desprovistos de sus electrones presentando una carga positiva. La carga parcial negativa del oxígeno ejerce atracción electrostática sobre las cargas positivas del hidrógeno de las moléculas adyacentes. Estas uniones

son débiles, y permiten que los oxígenos atraigan 4 moléculas de hidrógenos llamados enlaces de puente de hidrógeno, adquiriendo una conformación espacio reticular tanto en estado sólido como líquido. Estas interacciones son dipolo-dipolo [33].

1.4.2 PROPIEDADES DEL AGUA [27]

El agua tiene las siguientes propiedades físicas y químicas:

- **Estado físico:** sólida, líquida y gaseosa
- **Sabor:** insípida
- **Olor:** inodoro
- **Color:** incolora
- **Presión crítica:** 217,5 atmósferas.
- **Densidad:** 1 g./c.c. a 4°C
- **Punto de congelación:** 0°C
- **Punto de ebullición:** 100°C
- **Molalidad H₂O:** 55.508472 mol kg⁻¹
- **Concentración Molar H₂O:** 55.345 mol L⁻¹ (25°C)
- **pH H₂O:** 6.9996 (25°C)
- **Resistencia eléctrica:** 18.18 MΩ cm (25°C)
- **Tensión superficial H₂O:** 0.07198 J m⁻² (25°C)

El agua químicamente pura es un líquido inodoro e insípido; incoloro y transparente en capas delgadas. A la presión atmosférica de 760 milímetros el agua hierve a temperatura de 100°C y su calor de vaporización del agua alcanza temperaturas a 539 calorías/gramo[33]. Su presión de vapor crece con rapidez a medida que la temperatura se eleva y su volumen es mínimo a la de 4° Centígrados. A dicha temperatura la densidad del agua es máxima, y se ha tomado por unidad. A partir de 4° no sólo se dilata cuando la temperatura se eleva, sino también cuando se enfría hasta 0°: a esta temperatura su densidad es 0,99980 y al congelarse descende bruscamente hacia 0,9168, que es la densidad del hielo a 0°, lo que significa que en la cristalización su volumen aumenta en un 9 por 100.

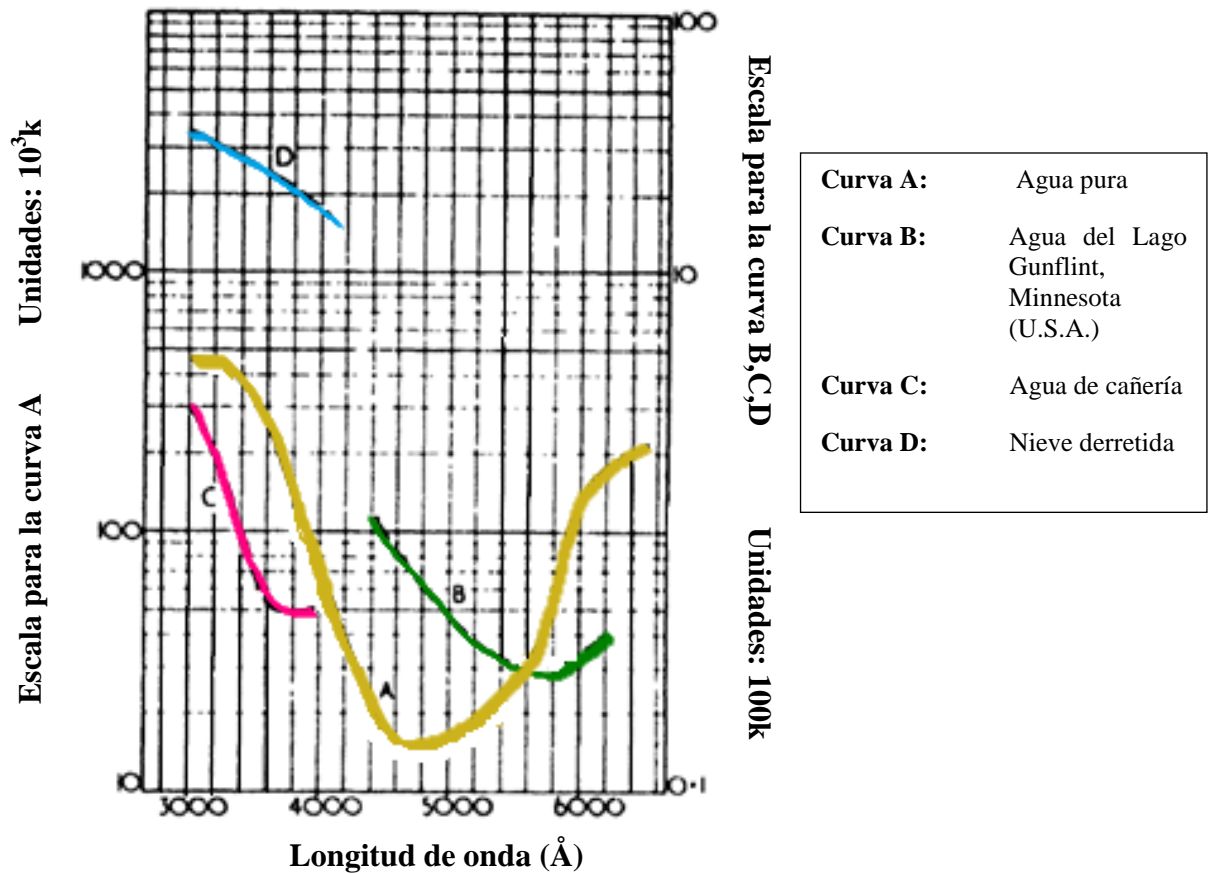
Tabla 1-2: Índice De Refracción Del Agua (20°C) Para Distintas Longitudes De Onda

LONGITUD DE ONDA	12560 Å	6708 Å	6563 Å	6438 Å	5893 Å	5461 Å
INDICE DE REFRACCIÓN	1.321	1.3308	1.3311	1.3314	1.3330	1.3345
LONGITUD DE ONDA	5086 Å	4861 Å	4800 Å	4047 Å	3034 Å	2144 Å
INDICE DE REFRACCIÓN	1.3360	1.3371	1.3374	1.3428	1.3581	1.4032

Fuente: JELLEY J. Cherenkov Radiation and its application.

1.4.3 CARACTERÍSTICAS DE ABSORCIÓN Y TRANSMISIÓN DE LUZ EN VARIAS MUESTRAS DE AGUA NATURAL

Gráfica 1-2: absorción de Luz en varias muestras de agua



Fuente: JELLEY J. Cherenkov Radiation and its application.

La atenuación es expresada en términos de la cantidad k en la ecuación [9]:

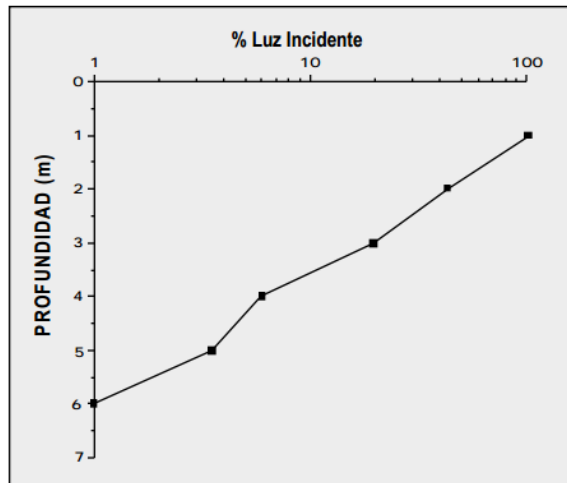
$$I = I_0 e^{-kx}. \quad (1.48)$$

I representa la intensidad del haz paralelo de luz, I_0 es la intensidad inicial después de pasar a través de una profundidad x del agua en cuestión. $k=1\text{cm}$ a la temperatura ambiente [9].

1.4.4 ABSORCIÓN DE LA LUZ EN EL AGUA

La porción de luz que incide sobre un cuerpo de agua no logra penetrar completamente la superficie del agua, ya que una parte de la luz incidente es reflejada inmediatamente [50].

Gráfica 1-3: Perfil de Penetración de la luz a través de una columna de agua.

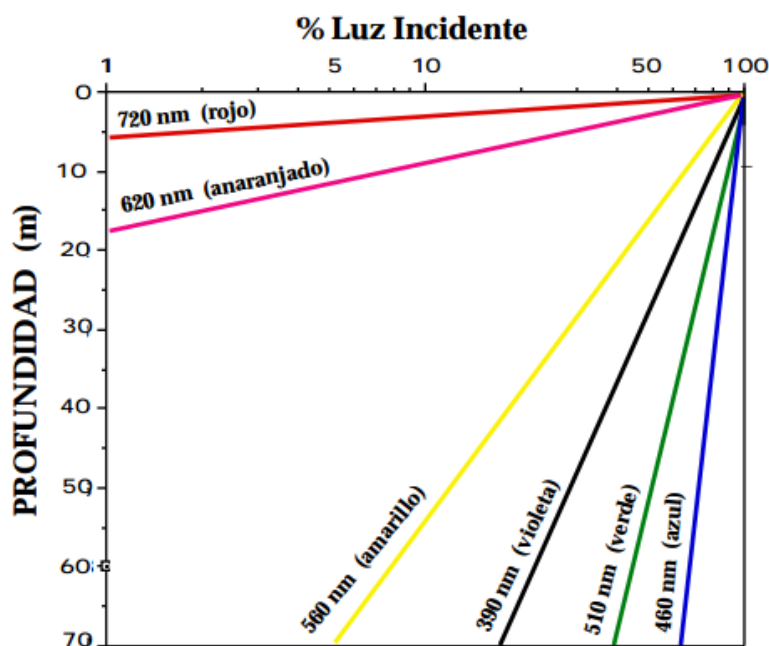


Fuente: <http://www.uprm.edu/biology/profs/massol/manual/p2-luz.pdf>

Este perfil revela que según la radiación solar penetra la columna de agua, ésta desaparece exponencialmente. La pendiente de esta curva variará para cada cuerpo de agua dependiendo de la cantidad de materia particulada en suspensión y de la materia disuelta. Si analizamos el patrón de absorción de la luz incidente observamos un

espectro de absorción diferencial de los diferentes largos de onda que componen el espectro de la luz visible [50].

Gráfica 1-4: Perfil de absorción en agua de componentes de la luz visible



Fuente: <http://www.uprm.edu/biology/profs/massol/manual/p2-luz.pdf>

Para aguas transparentes generalmente se encuentra que la radiación con mayor poder de penetración presenta largos dentro de la región azul, mientras que la radiación con mayor largo de onda (rojo) se absorbe rápidamente en los primeros 5 metros de profundidad. Este patrón de absorción diferencial puede variar con la presencia de sustancias que le imparten color al agua (ej. Gelbstoff¹⁸) y por los sólidos

¹⁸Gelbstoff, término alemán que significa literalmente "la materia amarilla". Término acuñado para referirse colectivamente a los compuestos orgánicos que producen amarilleo de las aguas del acuario, tanto dulces y marinas.

suspendidos¹⁹. El "Gelbstoff" es una sustancia húmica, soluble, de color amarillo, derivada de carbohidratos [42]. Esta sustancia absorbe luz visible en la región que cubre los largos de onda cortos (violeta, azul) al igual que los sólidos suspendidos. Por consiguiente, la presencia de estos componentes en el agua afecta no solo el color de agua, sino también la intensidad y el tipo de radiación disponible para la fotosíntesis. En aguas donde se observan cantidades apreciables de materia particulada y materia orgánica disuelta, se registra una disminución significativa en la transmitancia de la luz a lo largo de la columna y una reducción mayor en la penetración de los largos de onda cortos que en los largos de onda largos.

En agua pura, aproximadamente el 55% del total de luz incidente se disipa como calor y pierde intensidad en el primer metro de profundidad. Un 50% de la luz incidente es absorbida con cada metro adicional de profundidad. Tanto los largos de onda largos (rojo, anaranjado) como los largos de onda cortos (ultravioleta) pierden intensidad más rápido que los largos de onda intermedios (azul, verde amarillo). La luz azul es la radiación que predomina después de los 100 metros de profundidad [50].

1.4.5 ACTIVIDAD FOTOSINTÉTICA Y LA PENETRACIÓN DE LA LUZ [50]

¹⁹ Sólidos en suspensión son partículas sólidas pequeñas, inmersas en un fluido que actúa sobre la partícula con fuerzas en direcciones aleatorias, que contrarrestan la fuerza de la gravedad, impidiendo así que el sólido se deposite en el fondo.

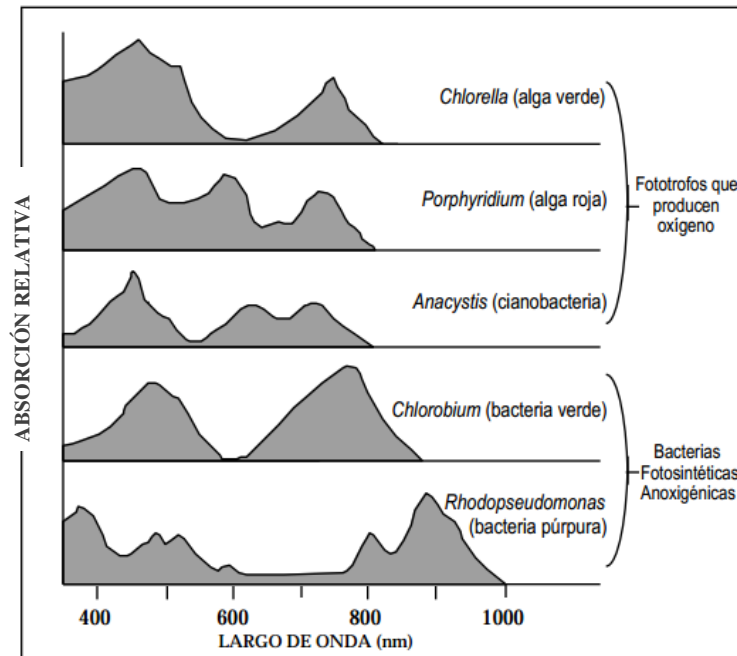
La intensidad y la composición espectral de la luz visible dentro de una columna de agua tienen un efecto marcado sobre la actividad metabólica que se desarrolla en todo el cuerpo de agua, ya que la calidad y la intensidad lumínica regulan la productividad primaria. En términos generales, la actividad fotosintética aumenta en función de la intensidad lumínica. La respuesta que presenta un organismo a cambios en la intensidad de luz dependerá de la intensidad de luz a la cual éste se ha adaptado y a su composición de pigmentos. Los fototrofos podrán adaptarse a cambios graduales en la intensidad de luz, dentro de las limitaciones que le impone su particular configuración de pigmentos fotosintéticos (clorofilas/bacterioclorofilas y pigmentos accesorios). Un caso interesante es el de algunas cianobacterias que llevan a cabo fotosíntesis oxigénica a altas intensidades de luz y cambian a un proceso de fotosíntesis anoxigénica a bajas intensidades de luz, utilizando entonces H_2S como donante de electrones. La composición espectral de la luz disponible en la columna de agua es otro factor importante que regula la actividad fotosintética. La habilidad de los fototrofos para utilizarla energía lumínica disponible depende principalmente de su habilidad para absorber los largos de onda disponibles lo cual está a su vez determinado por su contenido de pigmentos fotosintéticos (clorofilas/ bacterioclorofilas, ficobilinas, carotenoides).

Tabla 1-3: Composición de pigmentos y longitudes de onda utilizados por microorganismos fotótrofos. [50]

Organismo	Donante de Electrones	Pigmentos principales	Regiones de Absorción Máxima
ALGAS: ✓ Chlorophyta ✓ Euglenophyta ✓ Chrysophyta ✓ Charophyta ✓ Phaeophyta ✓ Pirrophyta ✓ Rhodophyta	H ₂ O	Clorofila a y b Clorofila a y b Clorofila a y c Clorofila a y b Clorofila a y c Clorofila a y c Clorofila a y c Clorofila a y c	Clorofila a: 680-685 nm (rojo) 430 nm (azul) Clorofila b: 660 nm (rojo) 450 nm (azul) Ficobilinas: 625-675nm (rojo)
CIANOBACTERIAS	H ₂ O	Clorofila a y ficobilinas	680-685 nm (rojo) Ficobilinas: 625-675 nm (rojo)
BACTERIAS FOTOSINTÉTICAS			
Bacterias Púrpuras	H ₂ S y compuestos orgánicos.	Bacterioclorofilas a y b.	Bacterioclorofilas a: 805nm 830-890nm Bacterioclorofilas b: 835-859 nm 1020-1040 nm
Bacterias Verdes	H ₂ S y compuestos orgánicos.	Bacterioclorofilas c, d, e y trazas de a.	Bacterioclorofilas c: 745-755 nm Bacterioclorofilas d: 705-740 nm Bacterioclorofilas e: 719-726 nm
Helio bacterias	H ₂ S y compuestos orgánicos	Bacterioclorofilas g	Bacterioclorofilas g: 788 nm-670 nm

Fuente: <http://www.uprm.edu/biology/profs/massol/manual/p2-luz.pdf>

Gráfica 1-5: Espectro absorción in vivo de varios microorganismos fototróficos



Fuente: <http://www.uprm.edu/biology/profs/massol/manual/p2-luz.pdf>

Las bacterioclorofilas difieren de las clorofilas de algas y cianobacterias tanto en estructura química como en su capacidad de absorber diferentes largos de onda de energía radiante. Dichas diferencias le permiten a las bacterias fotosintéticas vivir en ambientes acuáticos por debajo de capas densas de algas y cianobacterias, en zonas donde pueden utilizar la luz que no absorben las algas (rojo lejano e infrarrojo). La energía luminosa con largos de onda entre 600 y 685 nm es absorbida por la clorofila. La energía asociada a largos de onda menores de 600 es absorbida preferentemente por la clorofila y los pigmentos accesorios. Estos últimos pasan la energía a la clorofila [50].

CAPÍTULO II

CAPITULO II

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1. METODOLOGÍA

Para dar inicio la parte experimental, se realizó una revisión de la teoría acerca de la Radiación Cherenkov y su aplicación en los detectores de superficie, de radiación cósmica. Una vez entendido el mecanismo de producción de fotones Cherenkov, la importancia del medio de propagación de la radiación que en este caso es el agua, y sus características ideales, se procedió a analizar la calidad de las tres posibles fuentes de agua que van a abastecer los tanques Cherenkov que se instalarán en la ciudad de Riobamba: un prototipo en la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo y los tanques que se colocarán en el Volcán Chimborazo, por lo tanto, se tomaron muestras de agua procedentes de estos tres lugares para ser estudiadas mediante un análisis de laboratorio.

En base a los resultados obtenidos, se eligió la fuente de donde se tomará el agua, teniendo en cuenta las características ideales propuestas por varios autores, las cuestiones de traslado del agua, el precio y el alcance del tratamiento posterior que se aplicará para mejorar la calidad, que disminuya la absorción del agua en el rango del funcionamiento del fotomultiplicador.

2.1.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

- Por el nivel de Profundidad es de tipo: **Solución de Problemas**
- Por la secuencia de Estudio es de tipo: **Transversal**
- Por el tipo de datos por analizar es de tipo: **Cuantitativo**
- Por las condiciones de Estudio es de: **Laboratorio**
- Por la Utilización del Conocimiento es de tipo: **Aplicativo**
- Por la rigurosidad del método implementado es de tipo: **No experimental**
Descriptivo

2.2. MUESTREO

2.2.1 MUESTRAS DE AGUA SIN TRATAR

Las muestras de agua sin tratar fueron tomadas en diferentes horas del día y en diferentes lugares, dichas muestras fueron recogidas en envases de plásticos y de vidrio debidamente etiquetados con la fecha y hora en las que fueron tomadas, con el propósito de obtener datos representativos [29].

Tabla 2-1: Agua natural, sin tratamiento.

MUESTRA	LUGAR DE MUESTREO	TIPO DE AGUA	FECHA DE MUESTREO	HORA DE MUESTREO	TIPO DE ANALISIS
A1	Vertiente del Volcán Chimborazo (4530 msnm)	Agua Natural	07/03/2012	11h00	Físico-Químico
A2	Vertiente del Volcán Chimborazo (4530 msnm)	Agua Natural	07/03/2012	11h15	Absorbancia
A3	Vertiente del Volcán Chimborazo (4530 msnm)	Agua Natural	04/04/2012	10h30	Microbiológico
B1	Vertiente del Volcán Chimborazo (4589 msnm)	Agua Natural	07/03/2012	11h45	Físico-Químico
B2	Vertiente del Volcán Chimborazo (4589 msnm)	Agua Natural	07/03/2012	12h00	Absorbancia
B3	Vertiente del Volcán Chimborazo (4589 msnm)	Agua Natural	07/03/2012	12h00	Microbiológico
C1	Facultad de Ciencias ESPOCH	Agua de Consumo	16/03/2012	09h00	Físico-Químico
C2	Facultad de Ciencias ESPOCH	Agua de Consumo	16/03/2012	09h00	Absorbancia

Fuente: Tesista

Foto 2-1: Vertiente del Volcán Chimborazo (4530 msnm)-Reserva Faunística Chimborazo, Riobamba-Ecuador



Fuente: Tesista

Foto2-2: Vertiente del Volcán Chimborazo (4589 msnm)-Reserva Faunística Chimborazo, Riobamba-Ecuador



Fuente: Tesista

Foto 2-3: Facultad de Ciencias ESPOCH), Riobamba-Ecuador



Fuente: Tesista

2.2.2 MUESTRAS DE AGUA TRATADA

Las muestras de agua tratadas mediante distintos tipos de tratamientos, fueron tomadas en diferentes horas del día y en diferentes lugares, dichas muestras fueron recogidas en envases de plásticos y de vidrio debidamente etiquetados con la fecha y hora en las que fueron tomadas, con el propósito de obtener datos representativos.[45]

Tabla 2-2: Muestras de agua tratada.

MUESTRA	LUGAR DE MUESTREO	TIPO DE AGUA	TIPO DE TRATAMIENTO APLICADO	FECHA Y HORA DE MUESTREO	TIPO DE ANALISIS
D	Vertiente del Volcán Chimborazo (4530 msnm)	Agua Natural	Destilación	19/07/2012 17h00	Absorbancia
E	Vertiente del Volcán Chimborazo (4530 msnm)	Agua Natural	Destilación con posterior cloración	19/07/2012 18h00	Absorbancia
F	Vertiente del Volcán Chimborazo (4530 msnm)	Agua Natural	Cloración	19/07/2012 17h30	Absorbancia
G	Agua envasada	Agua de Consumo Humano	Ósmosis Inversa	19/07/2012 17h15	Absorbancia

Fuente: Tesista

Las muestras fueron tomadas bajo los Métodos Normalizados para Análisis de Aguas. (Ver ANEXO A).

2.3. MÉTODOS Y TÉCNICAS

2.3.1. MÉTODOS

MÉTODO DEDUCTIVO: Tomando en cuenta los fundamentos físicos desarrollados en general para la radiación Cherenkov que se propaga en medios transparentes, se deduce que el material transparente que cumple de la mejor manera con las características que la teoría indica es el agua confirmando que es el medio más factible para ser utilizado en el tanque. Así mismo basándose en el concepto de agua pura se trató de llegar lo más cerca posible a las características óptimas que este concepto indica.

MÉTODO DE ANÁLISIS: En esta investigación se analizó las propiedades del agua que determinan los elementos orgánicos e inorgánicos que pueden interferir en el paso de los fotones, es así que se realizaron distintas pruebas de laboratorio: pruebas físico-químicas, físicas y micro bacteriológicas para establecer una línea base.

MÉTODO INDUCTIVO: Una vez establecidas las características particulares del agua se estableció el tratamiento adecuado para lograr las características ideales del medio.

MÉTODO DE SÍNTESIS: Es el último método utilizado en esta investigación, mediante el cual se reúnen todos los datos encontrados para construir el Protocolo del agua.

2.3.2 TÉCNICAS

BIBLIOGRÁFICA: Con el fin de obtener información científica actual, se indagó bibliografía vigente: libros, publicaciones, documentales, revistas y páginas de internet, en lo que atañe a las áreas de física de partículas, física de detección de altas energías, tratamiento de aguas y afines, en la que conseguí información objetiva.

ENTREVISTA: tuve la oportunidad de entrevistar a Xavier Bertou investigador de la división de partículas del Centro Atómico Bariloche y a Beatriz García investigadora del Observatorio Pierre Auger, mediante algunas preguntas, obtuve información sobre astrofísica, física solar, física de partículas, funcionamiento del tanque, y el tratamiento de agua que se aplica en el observatorio de rayos cósmicos del Pierre Auger y en el tanque detector de partículas ubicado en Centro Atómico de Bariloche en San Carlos de Bariloche en Argentina.

ANÁLISIS DE LABORATORIO: Para los análisis de las propiedades del agua se utilizaron los servicios del Centro De Servicios Técnicos Y Transferencia Tecnológica Ambiental (CESTTA) Y el Laboratorio De Microbiología de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH.

2.4. DATOS EXPERIMENTALES

2.4.1. DIAGNÓSTICO

El agua a ser utilizada en el WCD, debe cumplir con una serie de parámetros, que se ven reflejados en la eficiencia de detección de fotones en el PTM, que trabaja en el intervalo de longitud de onda de (300-700) nm, es decir es necesario que los valores de absorbancia sean muy cercanos a cero, ya que con valores altos de absorción se pueden provocar posibles errores en la cuantificación de las señales debidos a las pérdida de información que ocasiona la absorción de los fotones Cherenkov por el agua.

2.4.2. DATOS

Para establecer las características iniciales del agua se realizaron pruebas: de pH, turbiedad, absorbancia, y determinaciones microbiológicas. Los resultados obtenidos de los análisis de laboratorio son los siguientes:

Tabla 2-3: Indicadores de Análisis de laboratorio

PARÁMETROS	MÉTODO/NORMA	VALORES DE REFERENCIA	INCERTIDUMBRE (k=2)
Potencial de Hidrógeno	PEE/LAB-CESTTA/05 APHA 4500 H ⁺		±0.15

Turbiedad	PEE/LAB-CESTTA/43 APHA 2130 B	< 2 NTU ²⁰	-
Absorbancia	Rango de (315-1100) nm	-	-
Recuento en Placa de Bacterias Heterótrofas UFC/1ml	Método estándar Extensión en superficie 9215C 20-28°C 5-7 días.	-	-
Recuento en Placa de Bacterias Heterótrofas UFC/100ml	Método estándar Extensión en superficie 9215C 4-6°C 5-7 días.	-	-
Colonias Coliformes Totales UFC/1ml	Método estándar 9222B Técnica de Filtración por membrana. Millipore. 44.5°C±0.2°C/24h	<1.1 ²¹	-
Colonias Coliformes Fecales UFC/100ml	Método estándar 9222D Técnica de Filtración por membrana. Millipore. 44.5°C±0.2°C/24h	<1.1	-
Recuento de Hongos UFC/1ml	Método estándar Extensión en superficie 9610A 20-28°C 5-7 días.	-	-
Recuento de Hongos UFC/1ml	Método estándar Extensión en superficie 9610A 4-6°C 5-7 días.	-	-
Oxígeno Disuelto	PEE/LAB-CESTTA/05 APHA 4500 –O C	No menor al 80% del oxígeno de saturación y n menos a 6mg/l	±0.15
Cloro Residual y Cloro Libre	PEE/LAB-CESTTA/05 APHA 4500 –Cl G	-	±43%

Fuente: Tesista

²⁰ Protocolo de Purificación de agua. [22]

²¹ Norma Técnica Ecuatoriana (NTE INEN 1 108) Límite máximo para aguas potables. <1.1 significa en el ensayo de NMP utilizando 5 tubos de 20 cm³ o 10 cm³ ninguno es positivo.

a) DATOS ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO

Condiciones Ambientales: T.máx.:24°C. T. min.: 19.0°C

Tabla 2-4: Datos del Análisis físico-químico

PARÁMETROS		UNIDAD	MUESTRA A1 Vertiente del Volcán Chimborazo (4530 msnm)	MUESTRA B1 Vertiente del Volcán Chimborazo (4589 msnm)	MUESTRA C1 Facultad de Ciencias ESPOCH
Examen Físico	Olor	-----	Inodora	inodora	inodora
	Color	-----	Incolora	incolora	incolora
	Aspecto	-----	Transparente	transparente	transparente
Turbiedad		UTN	0.68	0.61	0.65
Potencial de Hidrógeno		-----	7.91	8.06	7.15

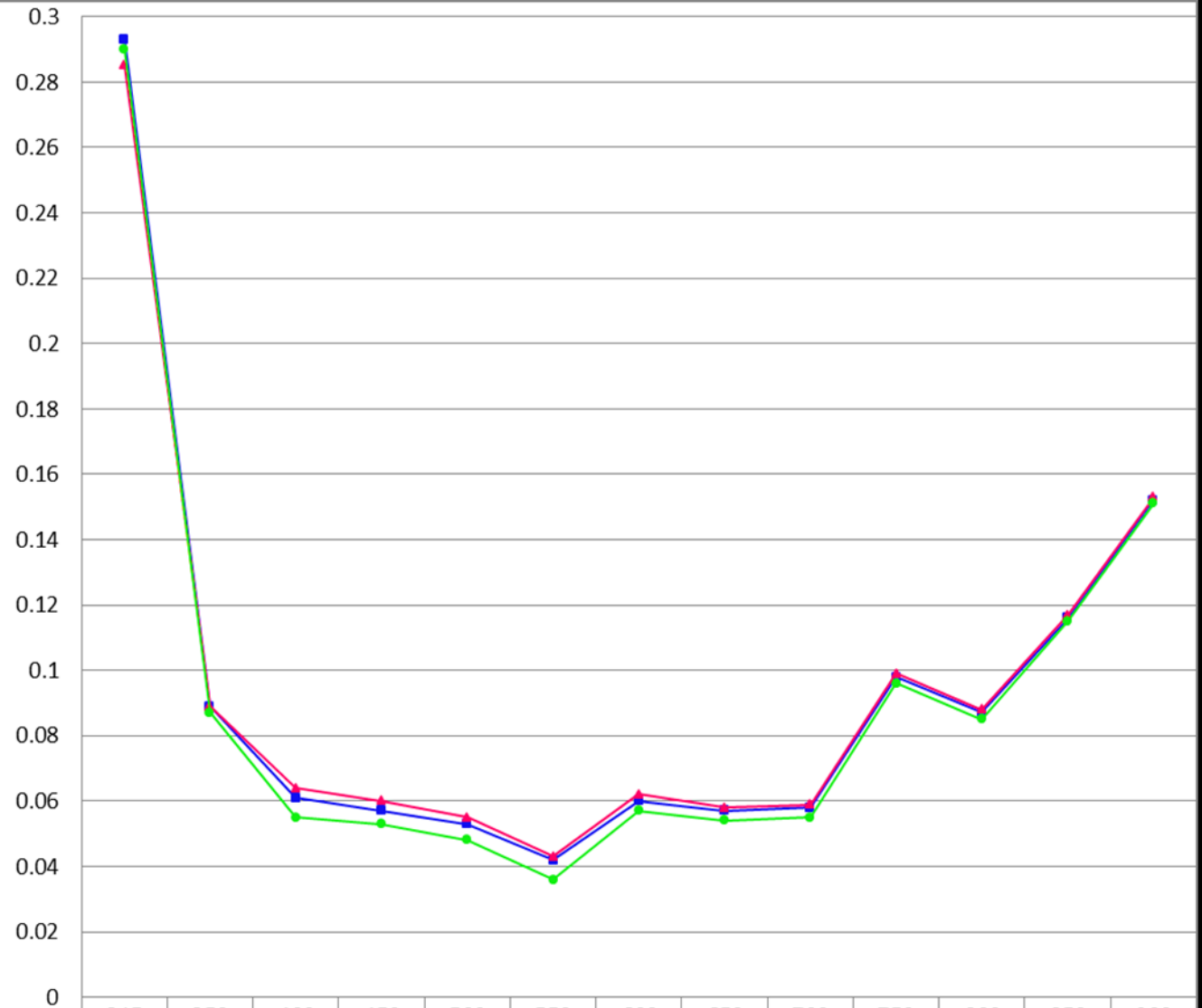
Fuente: Tesista

b) DATOS DEL ANÁLISIS DE ABSORBANCIA

Condiciones Ambientales: T.máx.:24°C. T. min.: 19.0°C

GRÁFICA 2-1: Comparación De La Absorbancia De Fotones En Diferentes Muestras De Agua

ABSORBANCIA



Fuente: Tesista

c) DATOS ANÁLISIS MICROBIOLÓGICOS

Tabla 2-5: Datos Análisis Microbiológicos.

DETERMINACIONES	MUESTRA A3 Vertiente del Volcán Chimborazo (4530 msnm)	MUESTRA B3 Vertiente del Volcán Chimborazo (4589 msnm)
Recuento en Placa de Bacterias Heterótrofas UFC/1ml	40	40
Recuento en Placa de Bacterias Heterótrofas UFC/100ml	20	20
Colonias Coliformes Totales UFC/1ml	1.2	2
Colonias Coliformes Fecales UFC/100ml	0	2
Recuento de Hongos UFC/1ml (20-28)°c	40	60
Recuento de Hongos UFC/1ml (4-6)°c	20	20

Fuente: Tesista

2.5 CORROBORACIÓN DE LA HIPÓTESIS

Con los datos experimentales obtenidos luego de realizar los análisis físico químicos, microbacteriológicos y de absorbancia, se confirma la hipótesis de este proyecto de tesis, dado que ninguna de las muestras de agua tomadas en los deshielos del volcán Chimborazo es apta para ser utilizada como medio detector del rastro de la radiación Cherenkov del

tanque detector de partículas cósmicas sin antes haber sido purificada mediante un tratamiento para eliminar elementos extraños presentes en ella.

Tabla 2-6: Corroboración hipótesis.

DETERMINACIONES	MUESTRA A3 Vertiente del Volcán Chimborazo (4530 msnm)	MUESTRA B3 Vertiente del Volcán Chimborazo (4589 msnm)	VALORES DE REFERENCIA
Colonias Coliformes Totales UFC/1ml	1.2	2	<1.1 ²²
Colonias Coliformes Fecales UFC/100ml	0	2	<1.1

Fuente: Tesista

Aunque los parámetros físico-químicos están dentro de los valores normales, el agua no posee las características de un medio de detección ideal, ya que los datos microbiológicos están fuera de los estándares establecidos para un agua tipo II, (Ver ANEXO B). Mediante el tratamiento que se elija y se aplique al agua de los deshielos del Chimborazo, se pretende lograr una disminución de la absorción de luz en el rango de luz visible (350-750)nm

²² Norma Técnica Ecuatoriana (NTE INEN 1 108) Límite máximo para aguas potables. <1.1 significa en el ensayo de NMP utilizando 5 tubos de 20 cm³ o 10 cm³ ninguno es positivo.

CAPÍTULO III

CAPITULO III

3. LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

3.1. BASE DE PARTIDA

Según los resultados obtenidos en los análisis de laboratorio la mejor fuente de abastecimiento de agua para el tanque Cherenkov es la perteneciente al *agua natural de la fuente ubicada en la reserva Faunística Chimborazo en el primer refugio del volcán Chimborazo a 4530 msnm.*

Foto 3-1: Fuente de agua, ubicada en la Reserva Faunística Chimborazo



Fuente: Tesista

Una vez elegida la fuente de agua, se procedió a aplicar varios tratamientos de manera que los valores de absorbancia disminuyan

3.2. TRATAMIENTOS APLICADOS

Los tratamientos aplicados, teniendo en cuenta las condiciones iniciales, son:

DESTILACIÓN: es un proceso que consiste en calentar el agua hasta que sus componentes más volátiles pasan a la fase de vapor y, a continuación, enfriar el vapor para recuperar dichos componentes en forma líquida por medio de la condensación. La finalidad principal de la destilación es obtener el componente más volátil, el agua, en forma pura. [47]. Para aplicar este tratamiento se utilizó un equipo de destilación por termo compresión (Ver anexo C) disponible en la Facultad de Ciencias de ESPOCH [23].

ÓSMOSIS INVERSA: El proceso de ósmosis inversa utiliza una membrana semipermeable que separa y elimina del agua sólidos, sustancias orgánicas, virus y bacterias disueltas en el agua. Puede eliminar alrededor de 95% de los sólidos disueltos totales (SDT) y 99% de todas las bacterias. Las membranas sólo dejan pasar las moléculas de agua, atrapando incluso las sales disueltas. Por cada litro que entra a un sistema de ósmosis inversa se obtienen 500 ml de agua de la más alta calidad, sin embargo, deben desecharse los otros 500 ml que contienen los SDT. Durante la operación, la misma agua limpia la membrana, lo que disminuye los gastos. Un equipo de filtración por ósmosis

inversa tiene un precio aproximado de \$3,000 a \$4,500. Su rendimiento diario es de 200 litros de agua.[47]

En nuestro caso no disponemos de este equipo de purificación, pero si existe en el mercado Ecuatoriano este tipo de agua purificada, al costo de 50 centavos de dólar el litro. En el caso de el tanque Cherenkov prototipo, son 1000 litros de agua, lo que significa el importe de \$500.

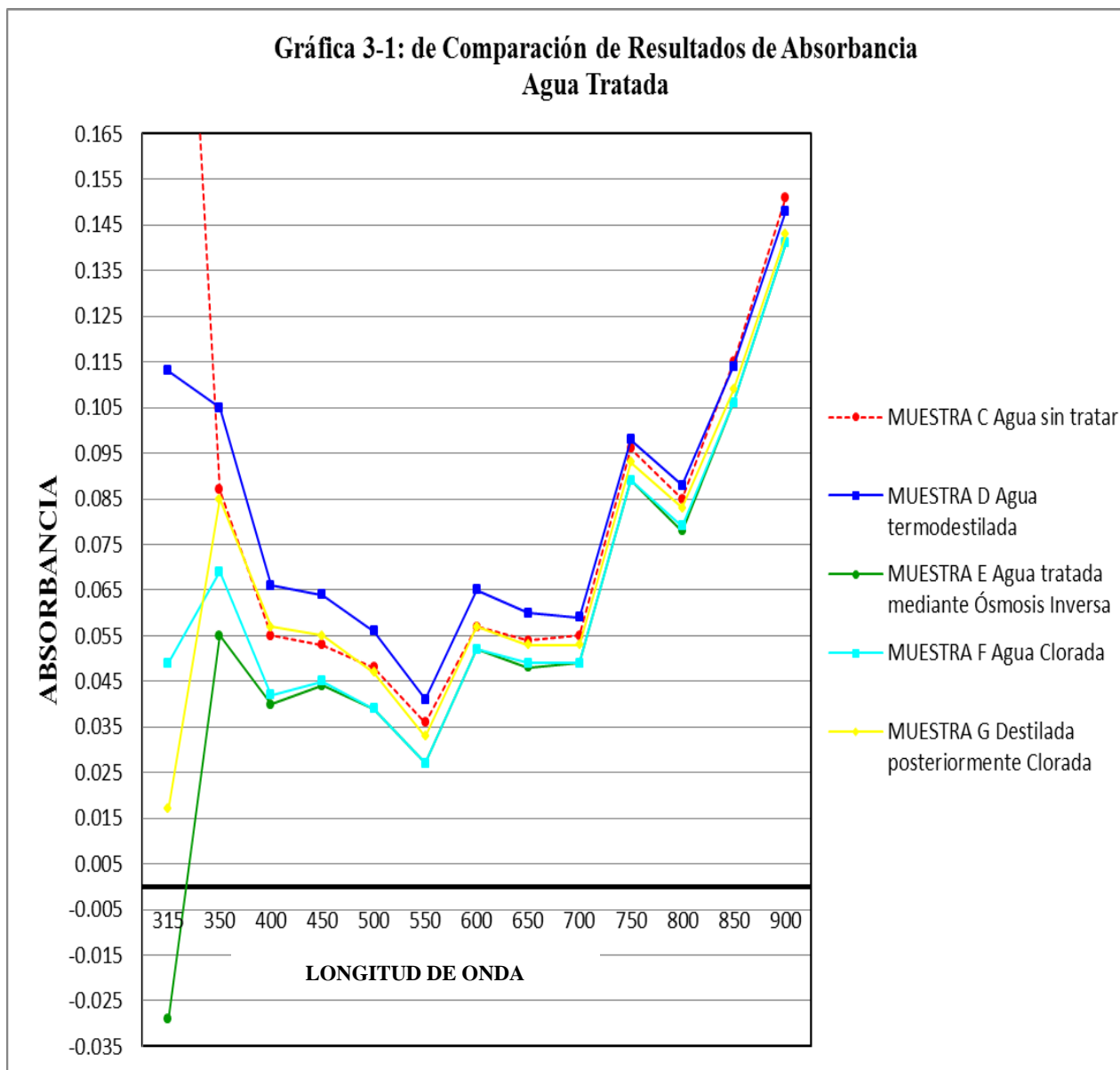
CLORACIÓN: La cloración es un método eficaz para eliminar las bacterias contenidas en el agua. La cantidad de esta sustancia que debe agregarse al agua depende de la concentración que tenga el compuesto de cloro que venden en su región (hipoclorito sódico o hipoclorito de calcio) y de la calidad de agua a tratar [35]. Para este caso se dispone en el mercado, una solución de hipoclorito sódico al 5% (50gr de cloro por litro de solución), la cantidad de cloro a colocar en el agua se calculó en base a la siguiente tabla [38]:

Tabla 3-1: Dosis de Cloración

CONCENTRACIÓN INICIAL DEL COMPUESTO CLORADO	CANTIDAD DE AGUA A DEPURAR			
(cloro libre o activo/litro)	2 litros	10 litros	100 litros	1000 litros
5% (50 gr. cloro/litro lejía)	2 gotas	12 gotas	6 ml	60 ml
10% (100 gr. cloro/litro lejía)	1 gotas	6 gotas	3 ml	30 ml

Fuente: http://www.itc.es/pdf/Technical_documents/Agua-marca-Esp.pdf

3.3 RESULTADO DE LOS TRATAMIENTOS APLICADOS



Fuente: Tesista

3.4 CÁLCULOS

3.4.1 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE FOTONES CHERENKOV PRODUCIDOS EN LAS DIFERENTES MUESTRAS DE AGUA

Tabla 3-2: Datos Utilizados en los cálculos

DATOS	VALOR
Velocidad De La Luz En El - Vacío (c)	299,792,458 m/s $\sim 3 \cdot 10^8$ m/s
Velocidad De La Luz En El Agua 20°C (v_l)	224,844,349 m/s
Velocidad Del Electrón en El Agua ²³	259,807,621.1 m/s
Constante De Planck (h)	$6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s = $4.135 \cdot 10^{-15}$ eV.s
Constante De Planck Reducida (\hbar)	1.0547×10^{-34} J.s 6.5821×10^{-16} eV.s
Estructura Fina α	1/137
Índice De Refracción Aire (n_{aire})	1.000293
Índice De Refracción Agua Destilada (n_1) ²⁴	1.27 ± 0.05
Índice De Refracción Agua sin tratar (n_0)	1.33
Índice De Refracción Agua Clorada (n_2) ²⁵	1.36 ± 0.05
Índice De Refracción Agua tratada con Ósmosis inv. (n_3) ²	1.37 ± 0.05

Fuente: Tesista

²³ Dato tomado de: JELLEY J. Cherenkov Radiation and its application.

²⁴ El índice de refracción determinado mediante un experimento con la ayuda de un banco óptico.

²⁵ El índice de refracción pertenece al agua clorada del tanque “Chimbito”, fue determinado mediante una experimento con la ayuda de un banco óptico.

Tabla 3-3: Datos del Espectro de Luz visible

ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO	LONGITUD DE ONDA (λ)	ENERGÍA ($E=h\nu$)
<i>Rojo</i>	(750-620) nm	(1.6-2.0) eV
<i>Anaranjado</i>	(620-590) nm	(2.0-2.1) eV
<i>Amarillo</i>	(590-570) nm	(2.1-2.2) eV
<i>Verde</i>	(570-495) nm	(2.5-2.7) eV
<i>Azul</i>	(495-450) nm	(2.7-3.0) eV
<i>Violeta</i>	(450-380) nm	(3.2-4.1) eV

Fuente: Tesista

Mediante la fórmula $E_{min} = \frac{0.511}{\sqrt{(2\delta)}} (MeV)$ donde $\delta = n - 1$, se encontró que la energía umbral para producir radiación Cherenkov en las diferentes muestras de agua en el tanque es:

Tabla 3-4: Energía Umbral para distintos índices de Refracción

Índice de refracción		Energía Umbral
Índice De Refracción Agua Destilada (n_1) (muestra D)	1.27	695 KeV
Índice De Refracción Agua sin tratar (n_0)(muestra A2)	1.33	629 KeV
<i>Índice De Refracción Agua Clorada (n_2)(muestra F)</i>	<i>1.36</i>	<i>602KeV</i>
Índice De Refracción Agua tratada con Ósmosis inversa. (n_3)(muestra G)	1.37	594 KeV

Fuente: Tesista

Tenemos que β es igual 0,87, ya que la velocidad de los electrones en agua es 259807621.1 m/s, y la velocidad de la luz $\approx 3 \times 10^8$:

$$\frac{dN}{dx} = 2\pi\alpha \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right) \quad (1.27)$$

$$\frac{dN}{dx} = 2\pi\alpha \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right)$$

$$\frac{dN}{dx} = 2\pi\alpha \left(1 - \frac{1}{(0.75)^2 (1.36)^2}\right) \left(\frac{1}{6.2 \times 10^{-4} \text{ mm}} - \frac{1}{7.5 \times 10^{-4} \text{ mm}}\right)$$

$$\frac{dN}{dx} = 2\pi\alpha (0.23) (279) = 2 \text{ fotones/mm}$$

Tabla 3-5: Número de fotones producidos por un electrón en un milímetro de recorrido dentro de diferentes muestras de agua con diferente índice de refracción.

Muestra De Agua	Energía umbral del Electrón	Índice de refracción	Espectro De Luz Visible	Número De Fotones Producidos en 1mm	Número De Fotones Producidos en el tanque (1.39m)
D	695KeV	1.27	Rojo(750-620) nm	2 fotones/mm	2780 fotones
			naranja (620-590) nm	0 fotones/mm	0 fotones
			Amarillo(590-570) nm	0 fotones/mm	0 fotones
			Verde(570-495) nm	2 fotones/mm	2780 fotones
			Azul(495-450) nm	2 fotones/mm	2780 fotones
			Violeta(450-380) nm	3 fotones/mm	4170 fotones
TOTAL				9 fotones/mm	12510 fotones
A2	629 KeV	1.33	Rojo(750-620) nm	3 fotones/mm	4170 fotones
			naranja (620-590) nm	1 fotones/mm	1390 fotones
			Amarillo(590-570) nm	0 fotones/mm	0 fotones
			Verde(570-495) nm	3 fotones/mm	4170 fotones
			Azul(495-450) nm	2 fotones/mm	2780 fotones
			Violeta(450-380) nm	5 fotones/mm	6950 fotones
TOTAL				14 fotones/mm	19460 fotones

F	602KeV	1.36	Rojo(750-620) nm	4 fotones/mm	5560 fotones
			naranja (620-590) nm	1 fotones/mm	1390 fotones
			Amarillo(590-570) nm	1 fotones/mm	1390 fotones
			Verde(570-495) nm	3 fotones/mm	4170 fotones
			Azul(495-450) nm	3 fotones/mm	4170 fotones
			Violeta(450-380) nm	5 fotones/mm	6950 fotones
TOTAL				17 fotones/mm	23630 fotones
G	594 KeV	1.37	Rojo(750-620) nm	4 fotones/mm	5560 fotones
			A naranja (620-590) nm	1 fotones/mm	1390 fotones
			Amarillo(590-570) nm	1 fotones/mm	1390 fotones
			Verde(570-495) nm	4 fotones/mm	5560 fotones
			Azul(495-450) nm	3 fotones/mm	4170 fotones
			Violeta(450-380) nm	5 fotones/mm	6950 fotones
TOTAL				18 fotones/mm	25020 fotones

Fuente: Tesista

3.4.2 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE FOTONES ABSORBIDOS

Tabla 3-6: Coeficientes de atenuación de acuerdo a su longitud de onda.

Longitud De Onda De Los Fotones Cherenkov	Coeficiente Absorción del Agua De la Muestra D
Rojo (750-620) nm	0,098 m ⁻¹
Naranja (620-590) nm	0,057 m ⁻¹
Amarillo (590-570) nm	0,060 m ⁻¹
Verde (570-495) nm	0,042m ⁻¹
Azul (495-450) nm	0,057m ⁻¹
Violeta (450-380) nm	0,089m ⁻¹
Longitud De Onda De Los Fotones Cherenkov	Coeficiente Absorción del Agua De la Muestra A2
Rojo (750-620) nm	0,096 m ⁻¹
Naranja (620-590) nm	0,054 m ⁻¹
Amarillo (590-570) nm	0,057 m ⁻¹
Verde (570-495) nm	0,036 m ⁻¹
Azul (495-450) nm	0,053 m ⁻¹
Violeta (450-380) nm	0,087 m ⁻¹

Longitud De Onda De Los Fotones Cherenkov	Coefficiente Absorción del Agua De la Muestra F
Rojo (750-620) nm	0,089 m ⁻¹
Naranja (620-590) nm	0,049 m ⁻¹
Amarillo (590-570) nm	0,052 m ⁻¹
Verde (7570-495) nm	0,027 m ⁻¹
Azul (495-450) nm	0,045m ⁻¹
Violeta (450-380) nm	0,042 m ⁻¹
Longitud De Onda De Los Fotones Cherenkov	Coefficiente Absorción del Agua De la Muestra G
Rojo (750-620) nm	0,089 m ⁻¹
Naranja (620-590) nm	0,048 m ⁻¹
Amarillo (590-570) nm	0,052m ⁻¹
Verde (570-495) nm	0,027 m ⁻¹
Azul (495-450) nm	0,044m ⁻¹
Violeta (450-380) nm	0,040m ⁻¹

Fuente: Tesista

Utilizando la fórmula: $N = N_0 e^{-ux}$, o a su vez, $I = I_0 e^{-ux}$ [2], donde u es el coeficiente de absorción y x la distancia atravesada por los fotones en este caso es 1,39 m. Aplicando la fórmula tenemos que teóricamente el porcentaje de fotones absorbidos por el agua en el agua en las diferentes muestras de agua es:

Tabla 3-7: Porcentaje de fotones absorbidos en las distintas muestras de agua.

Espectro De Luz Visible	Porcentaje de fotones absorbidos en el agua Muestra D	Porcentaje de fotones absorbidos en el agua Muestra A2	Porcentaje de fotones absorbidos en el agua Muestra F	Porcentaje de fotones absorbidos en el agua Muestra G
Rojo (750-620) nm	13 %	12%	11,7%	11%
naranja (620-590) nm	8 %	7 %	6.6 %	6.1%
Amarillo (590-570) nm	9 %	8 %	7 %	6.9
Verde (570-495) nm	6 %	5 %	3.7 %	3.4%
Azul (495-450) nm	8 %	7,2 %	5 %	4.5%
Violeta (450-380) nm	12 %	11 %	5,7 %	5,1%.

Fuente: Tesista

Tabla 3-8: Número de fotones no absorbidos en el agua y que podrían llegar al PTM.

Espectro De Luz Visible	Muestra D	Muestra A2	Muestra F	Muestra G
Rojo (750-620) nm	2296	3669	4909	4948
naranja (620-590) nm	0	1292	1298	1305
Amarillo (590-570) nm	0	0	1292	1294
Verde (570-495) nm	2613	3961	4015	5370
Azul (495-450) nm	2558	2579	3961	3982
Violeta (450-380) nm	3670	6185	6553	6595
TOTAL	11137	17686	22028	23494

Fuente: Tesista

3.5. RESULTADOS

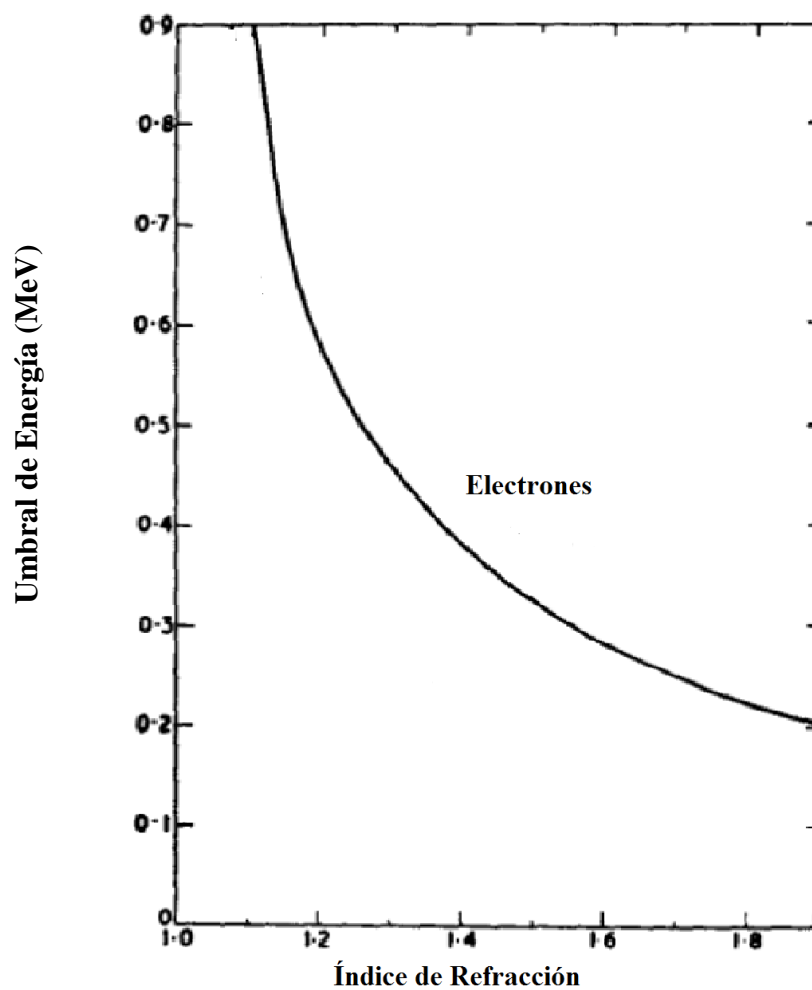
- El agua a utilizar es la extraída de la fuente ubicada a 4530 msnm en el primer refugio de la Reserva faunística Chimborazo (deshielos del volcán Chimborazo).
- El tratamiento elegido para aplicar al agua antes mencionada es la cloración por choque.

- iii. El índice de refracción del agua de los deshielos del volcán Chimborazo tratada mediante cloración por choque es 1.36, y la energía umbral que debe tener un electrón para producir radiación Cherenkov en esta agua es 602 KeV.
- iv. El número de fotones producidos por un electrón en el agua de los deshielos del volcán Chimborazo tratada mediante cloración por choque son: 4 fotones rojos por mm, 1 fotón naranja por mm, 4 fotones amarillos por mm, 3 fotones verdes por mm, 3 fotones azules por mm, 5 fotones violetas por mm, en total 17 fotones Cherenkov por milímetro de recorrido. Si un electrón atraviesa el tanque perpendicularmente se producirían 4170 fotones rojos, 1390 fotones naranjas, 1390 fotones amarillos, 4170 fotones verdes, 2180 fotones azules y 6950 fotones violetas, en total 19460 fotones Cherenkov.
- v. El porcentaje de los fotones absorbidos por agua de los deshielos del volcán Chimborazo tratada mediante cloración por choque es 11.7% para el rojo, 6.6% para el naranja, 7 % para el amarillo, 3.7% para el verde, 5% para el azul y 5.7% para el violeta.
- vi. El número de fotones que podrían llegar al fotomultiplicador, si estos son producidos y viajan en el agua de los deshielos del volcán Chimborazo tratada mediante cloración por choque es 22028 fotones, dependiendo de la dirección que tomen.

3.6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

- i. Se eligió el agua de fuente ubicada a 4530 msnm en el primer refugio de la Reserva faunística Chimborazo, para aplicar posteriores tratamientos, debido a sus características iniciales, es un agua de buena calidad dada su principal fuente de abastecimiento: los deshielos del volcán Chimborazo.
- ii. De los tratamientos aplicados: termo destilación, cloración y ósmosis inversa. Se deduce lo siguiente:
 - ✓ La destilación mediante termocompresión aumenta la absorbancia del agua en el rango de (315 a 900) nm, esto se debe a la presencia de óxido en el equipo.
 - ✓ Las muestras de agua con menor absorbancia son las pertenecientes al agua tratada mediante ósmosis inversa y al agua clorada por choque.
 - ✓ La cloración por choque adecuado ya que es bactericida, elimina la turbiedad y elimina ciertos minerales, lo que se refleja en una disminución considerable de la absorción de la luz visible, por esto y por su bajo costo de aplicación fue elegido como el tratamiento óptimo.
- iii. Dependiendo del tratamiento aplicado varía el índice de refracción, un mejor tratamiento se traduce en un índice de refracción más alto. Conforme el índice de refracción aumenta, el valor de la energía umbral de los electrones para la producción de radiación Cherenkov disminuye, como se observa en la siguiente gráfica:

Gráfica 3-2: Energía umbral del electrón en función del índice de refracción

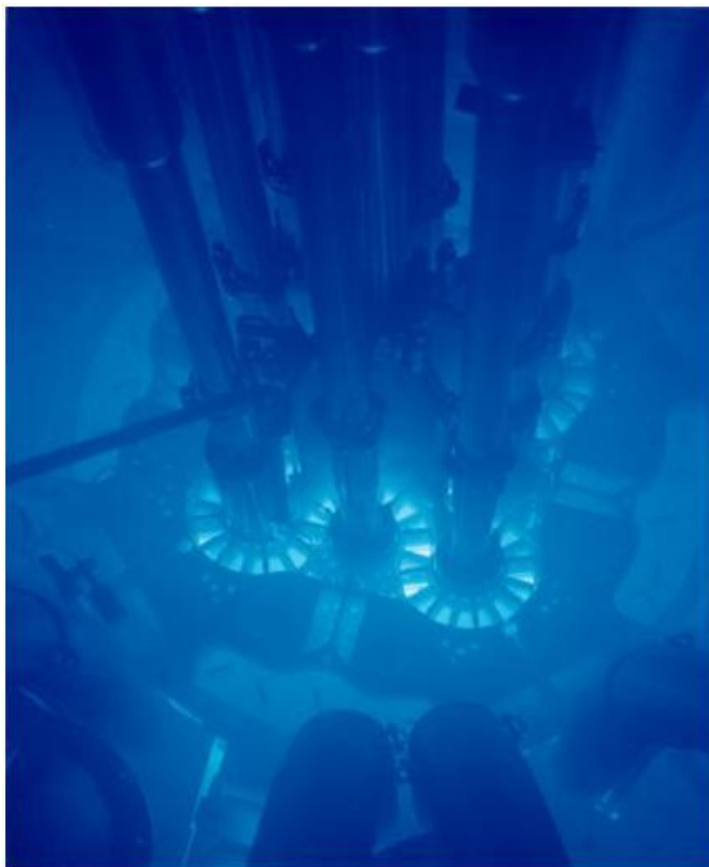


Fuente: Tesista

La energía mínima que debe tener un electrón para producir radiación Cherenkov, en el agua de los deshielos del volcán Chimborazo tratada mediante cloración por choque con índice de refracción $n_2 = 1.36$, es: 0.3 MeV.

- iv. Existe una mayor producción de fotones violetas, azules, verdes y rojos, los fotones naranja y amarillos son producidos en menor cantidad en el agua de los deshielos del volcán Chimborazo tratada mediante cloración por choque. En la teoría hemos visto que los fotones rojos son absorbidos en distancias cortas de recorrido en agua, esto debido a su baja energía y la alta absorción del agua en este rango de luz visible. Con esto se corrobora la teoría Cherenkov ya que la radiación que llega al fotomultiplicador y que percibe el ojo humano es azul y violeta.

Foto 3-2: Fotografía de la Radiación Cherenkov

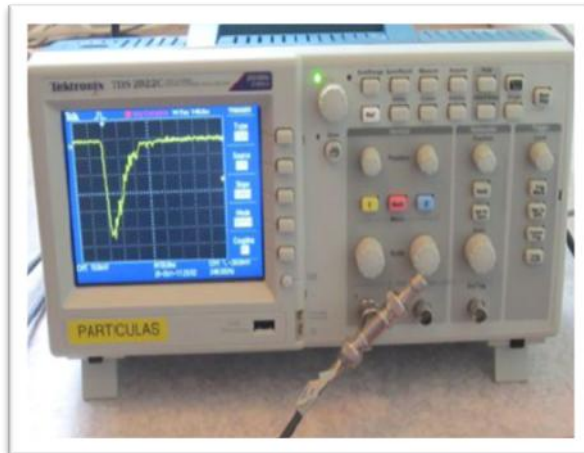


Fuente: www.2012quest.com

- vii. Teóricamente, deberían llegar al fotomultiplicador son 2208 fotones durante una trayectoria perpendicular en el tanque, este cálculo desprecia el recorrido que hagan los fotones antes de llegar al tanque. Una manera de saber cuantos fotones llegan en realidad es mediante los resultados que arroje el tanque.

Los fotones que llegan al PTM, se convierten en un flujo de electrones por el efecto fotoeléctrico y cierto voltaje aplicado que puede ir desde 0 hasta 1900V. Si se toma una medida con un osciloscopio a la salida del ánodo del PTM, se tiene un pulso de salida:

Foto 3-3:Pulso en un osciloscopio

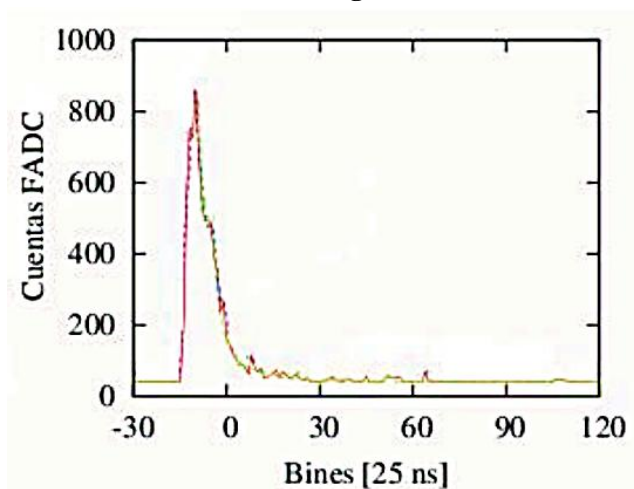


Fuente: Tesista

La electrónica del tanque registra cada uno de estos pulsos producidos por los fotones que llegan al fotomultiplicador, el máximo del pulso corresponde a los primeros fotones que llegan al PMT y los picos subsecuentes pertenecen a los fotones que rebotan dentro

del tanque más de una vez en las paredes difusas del detector hasta llegar al PMT o absorberse en el agua, integrando el pulso obtenemos la carga total en ADC del evento.

Gráfica 3-3: Carga total enADC



Fuente:<http://www.ib.cnea.gov.ar/~experim3/informes/2011-info3.pdf>

3.7 PROPUESTA

Luego de haber realizado el estudio de las propiedades del agua de diferentes fuentes abastecedoras, y tomando en cuenta el costo de traslado y costo del tratamiento se determinó que la mejor agua para ser usada en el tanque Cherenkov detector de partículas cósmicas es la de la fuente ubicada en el primer refugio de la reserva Faunística Chimborazo a 4530 msnm, y el tratamiento óptimo debido a su costo, facilidad de aplicación y resultados es la cloración por choque. (Ver ANEXO E).

CAPÍTULO IV

CAPÍTULO IV

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

1. El agua de los deshielos del volcán Chimborazo, tomada de la fuente ubicada a 4530 msnm en el primer refugio de la Reserva faunística Chimborazo es agua de buena calidad ya que posee características físico químicas dentro de los intervalos permitidos, los parámetros a corregir son los micro-bacteriológicos. Estos parámetros se vieron reflejados en la Absorbancia, que aumenta mientras más elementos o agentes extraños se encuentren presentes.
2. El tratamiento adecuado diseñado para el agua de los deshielos del Volcán Chimborazo es la cloración por choque, dado que tiene una acción bactericida, previene el crecimiento de algas, elimina el hierro, el manganeso, destruye el ácido sulfúrico, disminuye la turbiedad del agua, además de tener un efecto post tratamiento, debido al cloro residual, lo que hace que el agua tenga una duración teórica de dos años en condiciones adecuadas.
3. La cloración por choque es un tratamiento económico de fácil aplicación, además de ser útil en lugares alejados y de difícil acceso, ya que solamente se necesita un vaso de precipitación, guantes y mandil.

4. La cloración por choque, es un tratamiento invasivo, que al aplicarlo introduce un elemento extraño, el cloro, que al combinarse con diferentes elementos presentes en el agua, hace que estos se reduzcan, eliminen o precipiten, lo que representa un aumento de la reflectividad, lo que se traduce en un número mayor de fotones que llegan al fotomultiplicador.
5. Luego de haber realizado los cálculos teóricos se ha determinado que para el agua tratada con cloración por choque, la energía mínima que debe traer el electrón para producir radiación Cherenkov es 602 KeV, produciendo 17 fotones por milímetro en el rango de la luz visible (350-750) nm, con un porcentaje de absorción que va desde un 3.7% hasta un 11.7% dependiendo de la longitud de onda.
6. Si un electrón llega con esta energía a la superficie de la tierra significa que provino de un evento cósmico muy energético, este evento energético pudo provenir de algún punto del Ecuador Celeste en el plano de la galaxia (elíptica). Dado que nos encontramos en la zona Ecuatorial y tenemos una latitud 0° , tenemos la posibilidad de detectar eventos cósmicos que se producen en cualquier punto de la esfera celeste a excepción de las provenientes de los provenientes de constelaciones que se encuentran en los extremos: la cruz del sur y la estrella polar.
7. Al analizar los pulsos producidos por el fotomultiplicador con un osciloscopio, se tiene un ancho de pulso de 25 nano segundos, que es un pulso amplio lo que implica

que algunos fotones rebotaron dentro del tanque varias veces sin ser absorbidos antes de llegar al fotomultiplicador, validando así la calidad del agua del detector.

8. Los diferentes tratamientos aplicados y su correspondiente curva de absorción de los fotones Cherenkov han permitido elaborar un plan de manejo adecuado para el agua del detector, este cálculo se lo realizó en base al gradiente de temperatura diaria del sistema cubierta - tanque – agua, ubicado en la Escuela de Física y Matemática de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH.

4.2 RECOMENDACIONES

1. Dar seguimiento a la calidad del agua, mediante el rastreo y procesamiento de las señales que da el prototipo del tanque Cherenkov detector de partículas cósmicas, ubicado en el las inmediaciones de la Escuela de Física y Matemática de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH, para posteriormente aplicar el mismo tratamiento en los detectores que se ubicarán en la reserva faunística Chimborazo.
2. Seguir las instrucciones que se indica en el protocolo de purificación del agua de los deshielos del volcán Chimborazo.
3. En caso de encontrar en el mercado el compuesto: AMINO G, se recomienda agregarlo 24 horas después de la aplicación del cloro, antes de sellar herméticamente el tanque. El amino g, es un desplazador de longitud de onda, con fórmula química: $\text{NH}_2\text{C}_{10}\text{H}_5(\text{SO}_3\text{H})\text{SO}_3\text{Na}$.

4. Si se cuenta con los recursos económicos suficientes y se desea que el agua del tanque permanezca en un estado adecuado durante más tiempo se recomienda aplicar el tratamiento de ósmosis inversa en vez de la cloración por choque.

BIBLIOGRAFÍA:

1. **AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION.**, Métodos Normalizados para Análisis de Aguas Potables y Residuales., Traducido al español por Diorki S.A., Ediciones Díaz de Santos S.A., 1992., Pp.159.
2. **ATTIX, H.**, Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry., 2^a ed., Alemania., Litges & Dopf Buchbinderei GmbH., 2004., Pp.650.
3. **BURBANO DE ERCILLA, S., BURBANO DE GARCÍA, E., GRACIA, C.**, Física General., 32^a ed., s.l., Editorial Tebar., 2009., Pp.578.
4. **EISBERG, R., RESNICK, R.**, Física Cuántica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos y partículas., 1ra reimpresión, México., Editorial Limusa., 1979., Pp.833.
5. **FRENCH, A.**, Relatividad Especial., Traducido al español por J. Aguilar., 1ra reimpresión., España., Editorial Reverté, S.A., 1984., Pp.327.
6. **GENSER, I., YOUNGNER, P.**, Física., Traducido al español por Carmen Tagueña., 1ra reimpresión., México., Fotocomposición, S.A., 1975., Pp.748

7. **ISLAM, J.**, An Introduction To Mathematical Cosmology., 2^a ed., Reino Unido., Press Syndicate of the University of Cambridge., 2004., Pp.247.
8. **JACKSON, J.**, Classical Electrodynamics., 3^a ed., Estado Unidos., Hamilton Printing Company., 1998., Pp.791.
9. **JELLEY, J.**, Cerenkov Radiation and its Applications., Gran Bretaña., Page Bros. (Norwich) Ltd., 1958., Pp.301.
10. **KLAPDOR, H., ZUBER, K.**, Particle Astrophysics., Traducido al inglés por S M Foster., 1^a ed., Alemania., B G Teubner GmbH, Stuttgart., 2000., Pp.495.
11. **KNOLL, F.**, Radiation Detection and Measurement., 3^a ed., Jhon Wiley and Sons, Inc., United States of America., 2010., Pp.802.
12. **LETTERMN, R.**, Water Quality And Treatment., 5th ed., United States of America, Mc Graw.Hill,INC.,1999., Pp.879.
13. **SABADELL, M.**, ¿En qué consisten las explosiones de Rayos Gamma?, Muy Interesante (Argentina) Número 318., Pp. 34., Abril 2012.

14. **ALEXANDER, D., PATHAK, K., THOMPSON G.,**
Cherenkov energy loss of muons in water., Phys. A (Proc.
Phys.Soc.), Ser. 2., Vol. 1., 1968., GREAT BRITAIN
15. **CRONIN, W.,** Cosmic Rays: the most energetic particles in the
Universe., Review of Modern Physics No. 2,5165-5172 (1999).
16. **ALLARD, D., y otros.,** Detecting gamma-ray bursts with the Pierre
Auger Observatory using the single particle technique.,29th
International Cosmic Ray Conference Pune (2005) 00, 101-
04.
17. **MNAGANO, A.,** Observations and implications of the ultrahigh energy
cosmic rays., Review of Modern Physics 72., No.3,
689-732 (2000).
18. **SALAZAR, H., VILLASEÑOR, L.,** Rayos cósmicos ultraenergéticos:
el Observatorio Pierre Auger., Comunicaciones Libres-Ciencias.,
Enero-Marzo 2006.
19. **CHERNYAKOVA, M. y otros.,** Superorbital Modulation of X-Ray
Emission From Gamma-Ray Binary
Lsi., The Astrophysical Journal Letters (USA).,
747:L29 (5pp), 2012.

20. **PIRAN, T.**, The physics of gamma-ray bursts., Reviews Of Modern Physics- The American Physical Society., Vol. 76, October 2005.
21. **ECUADOR, INSTITUTO DE NORMALIZACIÓN.**, Norma Técnica Ecuatoriana, AGUA POTABLE. REQUISITOS., NTE INEN 1108:2006 Segunda Revisión., 2006.
22. **ASOREY, H.**, Reconstrucción de eventos con los detectores de superficie del observatorio Pierre Auger de rayos cósmicos., **Tesis.**, Maestría en ciencias físicas., San Carlos de Bariloche-Argentina, 2005.
23. **CHECA, L., MOINA, H.**, Diseño y Construcción de un Purificador de Agua Mediante Destilación por Termocompresión para la Facultad de Ciencias., **Tesis.**, Ingeniería Química., Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias., Riobamba-Ecuador., 2010.
24. **DE LEON, R.**, Detector Cherenkov de Agua., **Tesis.**, Licenciatura en Física Aplicada., Universidad de San Carlos de Guatemala Facultad de Ingeniería., Guatemala 2012.
25. **GOLUP, G.**, Estudio de las direcciones de arribo de los rayos cósmicos de ultra alta energía del observatorio Pierre Auger, **Tesis.**, Doctor en física., Universidad Nacional de Cuyo., Instituto Balseiro., Argentina., 2012.

26. **MELO, D.**, Reconstrucción de lluvias de partículas, análisis de los primeros datos y extensión híbrida del detector de fluorescencia a energías $\leq 1018\text{eV}$., **Tesis.**, Doctor en ciencia y tecnología mención física., Universidad Nacional De General SanMartín., Argentina., 2007
27. **PÉREZ, Y.**, Caracterización de Detectores Cherenkov en el Proyecto LAGO (LargeAperture GRB Observatory)., **Tesis**, Licenciado en Física., Universidad de los Andes, Facultad de Ciencias., Mérida-Venezuela., 2009.
28. **QUISPE, J.**, Búsqueda de Destellos de Rayos Gamma (GRBs) en el monte Chacaltaya con detectores de agua Cherenkov., **Tesis.**, Físico., Universidad Mayor De San Andrés Facultad De CienciasPuras Y Naturales., La Paz-Bolivia., 2010.
29. **RAMOS CIFUENTES, A.**, Diseño del Sistema del Tratamiento de Aguas Residuales para Juive Chico-La Pampa (Baños-Tungurahua)., **Tesis.**, Ingeniería en Biotecnología Ambiental., Escuela Superior Politécnica del Chimborazo., Riobamba-Ecuador., 2009.
30. **RIVERA BRETEL, H.**, Implementación y Calibración de un Prototipo de Detector Cherenkov de Chubascos Atmosféricos., **Tesis.**, Físico., Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Ciencias Puras y Naturales., La Paz- Bolivia., 2007.

BIBLIOGRAFÍA EN INTERNET:

31. **ABSORCIÓN.**

[http://es.wikipedia.org/wiki/Absorci%C3%B3n_\(%C3%B3ptica\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Absorci%C3%B3n_(%C3%B3ptica))

13/08/2012.

32. **ABSORCIÓN SELECTIVA.**

http://www.fisicanet.com.ar/fisica/ondas/ap13_absorcion_selectiva.php

10/06/2012.

33. **AGUA PURA.**

http://www.humboltdemexico.com/datos/webs/glosario/agua_pura.htm

02/07/2012.

34. **ASTM.**

<http://es.wikipedia.org/wiki/ASTM>

02/06/2012.

35. **CLORACIÓN DE AGUA POTABLE.**

http://www.itc.es/pdf/Technical_documents/Agua-marca-Esp.pdf

12/07/2012.

36. COMPONENTES DEL SISTEMA Y APROVECHAMIENTO DEL AGUA LLUVIA.

<http://www.pnuma.org/recnat/esp/documentos/cap3.pdf>

03/07/2012.

37. COSMIC RAYS.

www.pdg.lbl.gov

04/04/2012.

38. CUADROS PARA LA CLORACIÓN DEL AGUA.

[http://www.seg-](http://www.seg-social.es/ism/gsanitaria_es/ilustr_anexos/anexo8.htm)

[social.es/ism/gsanitaria es/ilustr anexos/anexo8.htm](http://www.seg-social.es/ism/gsanitaria_es/ilustr_anexos/anexo8.htm)

21/07/2012.

39. DISPERSIÓN.

[http://es.wikipedia.org/wiki/Dispersi%C3%B3n de la luz](http://es.wikipedia.org/wiki/Dispersi%C3%B3n_de_la_luz)

16/8/2012.

40. DISPERSIÓN REFRACTIVA.

[http://es.wikipedia.org/wiki/Dispersi%C3%B3n \(f%C3%ADscica](http://es.wikipedia.org/wiki/Dispersi%C3%B3n_(f%C3%ADscica)

[l](http://es.wikipedia.org/wiki/Dispersi%C3%B3n_(f%C3%ADscica)

15/08/2012.

41. ELECTRODINÁMICA.

http://es.wikipedia.org/wiki/Electrodin%C3%A1mica_cu%C3%A1ntica

03/06/2012.

42. GELBSTOF.

<http://freshaquarium.about.com/od/termsandtables/g/gelbstoff.htm>

14/05/2012.

43. GLACIALES.

<http://es.wikipedia.org/wiki/Glaci%C3%A1r>

02/09/2012.

44. LA WEB DE LA BIOGRAFÍAS.

www.mcnbiografias.com

25/07/2012.

45. LIBRO DE PURIFICACIÓN DE AGUA.

http://www.cienytec.com/PDFS/Agua_Pura_laboratorio_Barnstead.pdf

01/07/2012.

46. MASA, RADIO Y CARGA DEL ELECTRÓN Y G (CTE. GRAVITACIÓN), EN FUNCIÓN DE LAS CONSTANTES FUNDAMENTALES H (CTE. PLANCK) Y C (VELOCIDAD DE LA LUZ).

<http://www.gsjournal.net/old/stham/garrigues1.pdf>

16/04/2012.

47. MÉTODOS PARA PURIFICAR EL AGUA.

<http://www.5pasossonora.com/pdf/purificarelagua.pdf>

20/08/2012.

48. MÉTODO SIMPLE PARA MEDIR EL ÍNDICE DE REFRACCIÓN EN UN LÍQUIDO

<file:///F:/El%20Tao%20de%20la%20F%C3%ADsica%20%20M%C3%A9todo%20simple%20para%20medir%20el%20%C3%ADndice%20de%20refracci%C3%B3n%20en%20un%20l%C3%ADquido.htm>

30/09/2012.

49. MUON STOPPING POWER AND RANGE TABLES 10 MEV–100 TEV.

<http://pdg.lbl.gov/2008/AtomicNuclearProperties/adndt.pdf>

04/05/2012.

50. PARÁMETROS FÍSICO QUÍMICOS DE LA LUZ.

<http://www.uprm.edu/biology/profs/massol/manual/p2-luz.pdf>

13/06/2012.

51. PLASMÓN.

<http://es.wikipedia.org/wiki/Plasm%C3%B3n>

12/08/2012.

52. PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN: LARGE APERTURE GAMMA RAY BURST OBSERVATORY.

<http://cevale2.uis.edu.co/~cevale2/wiki/images/LAGOArCo2011.pdf>

02/05/2012.

53. PROTOCOLO DE PURIFICACIÓN DE AGUA.

[http://cevale2.uis.edu.co/~cevale2/wiki/index.php/Protocolo de purificacion de agua](http://cevale2.uis.edu.co/~cevale2/wiki/index.php/Protocolo_de_purificacion_de_agua)

10/04/2012.

54. TIEMPO DE VIDA MEDIO DEL μ - EN AGUA.

<http://www.ib.cnea.gov.ar/~experim3/informes/2011-info3.pdf>

16/06/2012.

55. VITALI LÁZAREVICH GÍNZBUR.

http://es.wikipedia.org/wiki/Vitaly_Lazarevich_Ginzburg.

13/04/2012.

ANEXOS

ANEXO A

MÉTODOS NORMALIZADOS PARA LA TOMA DE MUESTRAS

RECIPIENTES

- Análisis Físico-Químicos: Envases previamente enjuagado al menos 3 veces con la misma agua a ser muestreada de 1000 ml.
- Análisis Microbacteriológico: Envases estériles de 100ml.
- Análisis Físico: Envases de 750ml que sean oscuros, de manera que no penetre la luz solar.

PROCEDIMIENTO DE TOMA DE MUESTRAS

Dejar un amplio espacio aéreo (al menos 2.5 cm) en el envase para facilitar la mezcla por agitación antes de proceder al estudio. Los envases que utilice deben mantener cerrados hasta el momento del muestreo. Retirar las tapas evitando contaminar la superficie interna de la tapa. Se llenará la botella sin enjuagarla y se cerrará inmediatamente la tapa. Tomar primero la muestra para el análisis microbiológico.

DATOS DE IDENTIFICACIÓN

Las muestras deben ir de datos descriptivos y de identificación exactos tales como:

- Fecha y hora de muestreo
- Persona o entidad que solicita el análisis con su dirección y teléfono.
- Tipo de muestra (agua potable, de río, residual, vertiente, entubada, etc)
- Descripción del lugar
- Ubicación (comunidad, parroquia, cantón, provincia)
- Características sensoriales (aspecto, color, olor)
- Ensayos solicitados

TIEMPO Y TEMPERATURA DE CONSERVACIÓN.

Los estudios microbiológicos, físico-químicos y físicos de las muestras deben iniciarse en no más de 24 horas. Es decir, desde el momento de la toma de muestra hasta el momento del análisis deberá transcurrir el menor tiempo posible, y el tiempo máximo transcurrido debe ser de no mas de 24 horas. El transporte de las muestras al laboratorio debe realizarse por debajo de los 10 °C en un termo con hielos, en caso de no disponer de esto, utilizar un cartón revestido de espuma flex con hielos en el fondo para mantener un ambiente frío. [47]

ANEXO B

AGUA PURA: FUNDAMENTOS

En términos de laboratorio, el agua pura, esta definida por sociedades profesionales interesadas en la calidad, uniformidad y reproducción de las pruebas; utilizando agua purificada. [33]

AGUA TIPO I

Usada para procedimientos que requieren de máxima exactitud y precisión; tales como espectrometría atómica, fotometría de llama, enzimología, gas en la sangre, soluciones buffer de referencia y reconstitución de materiales liofilizados usados como estándares. El agua Tipo 1, debe seleccionarse siempre que en la prueba sea esencial un nivel mínimo de componentes ionizados o cuando se preparan soluciones para análisis de rastreo de metales.

AGUA TIPO II

Recomendada para la mayoría de las pruebas analíticas y generales de laboratorio, tales como los análisis hematológicos, serológicos y microbiológicos; así como para métodos químicos en los que específicamente no se indique o se haya comprobado que requiere agua de calidad Tipo I. La ASTM especifica que el agua que el agua Tipo II sea preparada por destilación y como factor importante recomienda que este siempre libre de impurezas orgánicas.

AGUA TIPO III

Satisfactoria para algunas pruebas generales de laboratorio; para la mayoría de los análisis cualitativos, tales como uro análisis, procedimientos histológicos y parasitológicos; para el enjuague de muestras analíticas; preparación de soluciones

estándar; y para lavado o enjuague de cristalería (el enjuague final de la cristalería debe hacerse con el tipo de agua especificado para el procedimiento realizado). Para obtener agua Tipo III, se puede utilizar la destilación, la des ionización de capas mezcladas y la osmosis inversa (alimentando con agua de alta calidad).[33].

RESUMEN DE LAS ESPECIFICACIONES CON RESPECTO A LA RESISTENCIA ESPECÍFICA, CONTAMINACIÓN BACTERIOLOGICA Y SILICATOS						
	CAP/NCCLS			ASTM		
	TIPO I	TIPO II	TIPO III	TIPO I	TIPO II	TIPO III
Cultivo/Conteo de Colonias (Unidades que conforman las Colonias/ MI)	<10.0	10 ³	N.A.	TIPO A *0	TIPO B <10	TIPO C <10 ²
pH	N.A.	N.A.	5.8-8.0	N.A.	N.A.	6.2-7.5

*ASTM (American Society for Testing Materials)²⁶, Para bacterias

ASTM (American Society for Testing Materials), Sociedad Americana de Pruebas y Materiales.

CAP (Colegio Americano de Patólogos)

NCCLS (Comité Nacional de Estándares para Laboratorios Clínicos)

N.A. No Aplicable

N/D No Determinable

²⁶ ASTM o ASTM International es un organismo de normalización de los Estados Unidos de América [34]

ANEXO C

INSTRUCCIONES EQUIPO PURIFICADOR DE AGUA MEDIANTE DESTILACIÓN POR TERMOCOMPRESIÓN



Este equipo purificador de agua por destilación mediante termocompresión en su totalidad fue construido en acero inoxidable con planchas de 1,5 mm de espesor y tuberías de $\frac{1}{2}$ pulgada, posee dos resistencias de 1200 W cada una, tiene un controlador automático de temperatura y posee un medidor de nivel del tipo vaso comunicante. El equipo está constituido por tres cámaras: de ebullición, de precalentamiento y de condensación, funciona por medio de energía eléctrica, es alimentado por 35 L de agua y produce 10 L/hora de destilado. Posee una entrada de 220 V o 240 V [23].

Instrucciones de Uso:

1. Antes de iniciar con la alimentación del flujo de agua se debe verificar que las válvulas de desfogue y de purga se encuentren en posición cerrada, la válvula de ingreso en posición abierta igual que la válvula de paso.
2. Iniciar con la alimentación del flujo de agua, de modo moderado.
3. Observar el controlador de nivel de manera frecuente, para suspender la alimentación del flujo de agua, en el momento que alcance el nivel óptimo de operación.
4. Proceder a encender el equipo, mediante el switch. El controlador automático de temperatura ya está previamente calibrado se recomienda no manipularlo.
5. Al momento que el controlador de temperatura muestre 80°C, cambiar la posición de la válvula de desfogue a media abierta y poner en posición cerrada la válvula de paso.
6. Inmediatamente ubicar un recipiente óptimo en la salida de descarga, para recolectar el agua producida.
7. Es muy importante controlar periódicamente el nivel de agua en el interior del equipo mediante, el controlador de nivel, para nuevamente proceder a alimentarlo o a apagarlo.

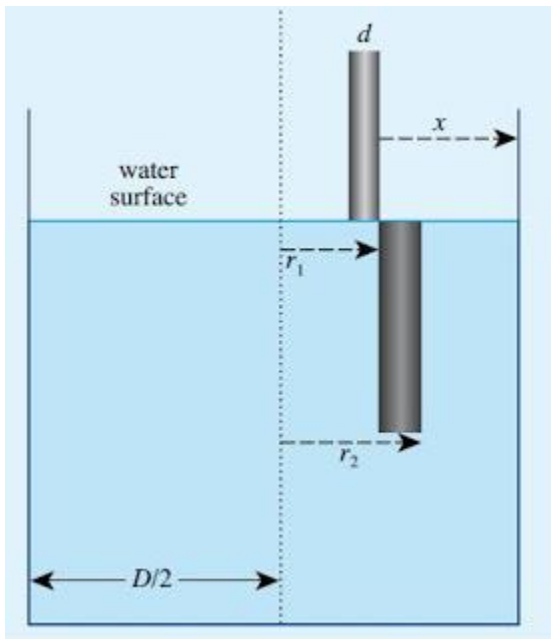
Después de cada operación de producción es recomendable realizar un lavado rápido del equipo para lo cual deben realizarse los siguientes pasos:

- a. Verificar que el equipo no este encendido.
- b. Revisar la válvulas de desfogue y de regulación
- c. Abrir las válvulas de paso y purga. Alimentar el equipo con abundante agua durante 5 min.

ANEXO D

MÉTODO PARA MEDIR EL ÍNDICE DE REFRACCIÓN EN UN LÍQUIDO

Este experimento cuantitativo, se basa en la refracción de la imagen de un popote. Se necesita un objeto delgado y largo (popote), un vaso cilíndrico, una regla y un cartón. En el cartón se hace una hendidura por donde pase el popote, y se coloca sobre un vaso con 3/4 del líquido a estudiar [48].



Primero el palito debe estar verticalmente en el centro del vaso, de modo que no se verá roto por el efecto de refracción. Después, desplazamos el palito y veremos como el efecto de refracción crece mientras más nos acercamos a la orilla. Hay una distancia crítica donde se completa la separación aparente, hay que medir la distancia lateral x , también hay que medir el grosor del palito

d y el diámetro del vaso D . Del diagrama podemos hacer unos simples cálculos:

$$nd = r_1 - r_2,$$

Además

$$r_2 = nr_1,$$

Del diagrama tenemos:

$$r_1 = D/2 - x$$

La combinación de estas relaciones nos da:

$$n = \frac{D/2 - x}{D/2 - x - d}.$$

ANEXO E

PROTOCOLO DE PURIFICACIÓN DEL AGUA DE LOS DESHIELOS DEL VOLCÁN CHIMBORAZO



AGUA DE LOS DESHIELOS DEL VOLCÁN CHIMBORAZO.

AGUA NO APTA PARA EL CONSUMO HUMANO

Presentación

Este protocolo es aplicado al agua perteneciente a la fuente ubicada en la reserva Faunística Chimborazo, en el primer refugio del volcán Chimborazo a 4530 msnm. El agua será utilizada en el tanque Cherenkov, detector de partículas cósmicas, como medio de producción y propagación de los fotones Cherenkov, debido a la interacción de las partículas cargadas con el agua.

La fuente de captación de agua tiene dos abastecedores de características bien diferenciadas:

Deshielos de los glaciales del Volcán Chimborazo

El glaciar es una gruesa masa de hielo que se origina en la superficie terrestre por acumulación, compactación y recrystalización de la nieve [7]. Tiene características de agua pura, dada la zona en donde se encuentra.

Agua lluvia

El agua proveniente de las precipitaciones que se dan en la zona de la reserva Faunística Chimborazo, es agua extremadamente limpia en comparación con las otras fuentes de agua dulce disponibles [4].

Este protocolo está diseñado estrictamente para el agua del tanque Cherenkov Detector de Partículas Cósmicas.

Características Iniciales Del Agua

La fuente ubicada a 4530 msnm en el primer refugio de la reserva faunística Chimborazo, provee agua con las siguientes características:

Tabla 1: CARACTERÍSTICAS MICROBIOLÓGICAS

DETERMINACIONES	RESULTADOS
Recuento en Placa de Bacterias Heterótrofas UFC/1ml	40
Recuento en Placa de Bacterias Heterótrofas UFC/100ml	20
Colonias Coliformes Totales UFC/1ml	1
Colonias Coliformes Fecales UFC/100ml	0
Recuento de Hongos UFC/1ml (20-28)°C	40
Recuento de Hongos UFC/1ml (4-6)°C	20

Protocolo de Purificación de Agua del Tanque Cherenkov Detector de Partículas Cósmicas

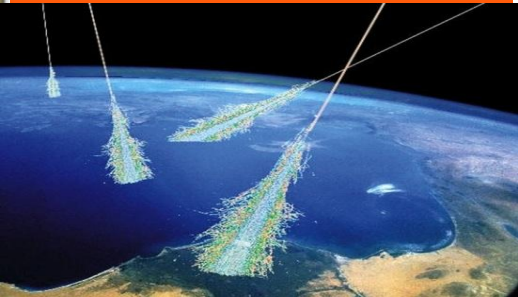


Tabla 2: CARACTERÍSTICAS FÍSICO QUÍMICAS

PARÁMETROS	UNIDAD	RESULTADOS
Olor	---	Inodora
Color	---	Incolora
Aspecto	---	Transparente
Turbiedad	UTN	0.68
Potencial de Hidrógeno	---	7.9 ¹

Podemos constatar que el agua se encuentra dentro de los parámetros normales para aguas de alta calidad [10] en cuanto a características físico-químicas se refiere, sin embargo, existe una pequeña anomalía en los parámetros microbiológicos, que se supone se deben a la invasión de animales salvajes y presencia humana en el lugar, es por esto que se debe considerar un tratamiento que disminuya los elementos microbiológicos antes de utilizar el agua como medio detector del tanque Cherenkov.

Luego de haber realizado un estudio comparativo de varios tratamientos propuestos para mejorar la calidad del agua, que en nuestro caso se traduce en una absorbancia lo más cercana a cero, se llegó a la conclusión de que la cloración era el método de purificación más adecuado, dada su facilidad de aplicación, bajo costo y excelentes resultados en la destrucción e inactivación de organismos patógenos presentes en el agua, principalmente bacterias, virus y protozoos [8].

Visto que la finalidad del agua no implica el consumo humano, se eligió el método de *cloración por choque*.

Cloración por Choque



La cloración por choque es un método utilizado para mejorar la calidad y sanidad del agua almacenada en tanques [11]. Es denominado de choque ya se utiliza una gran concentración de



Cloro, hasta 200 mg de cloro por litro de agua con un posterior tiempo de acción de 12 a 24 horas, antes de ser usada. Los productos de la familia del cloro más habituales para realizar la desinfección son: cloro gaseoso, hipoclorito sódico e hipoclorito cálcico. Además de su aplicación como desinfectante, el cloro y sus derivados han demostrado ser útiles también en: control de olores y sabores, prevención de crecimiento de algas, eliminación de hierro y manganeso y destrucción de ácido sulfhídrico [5].

Cálculo de la cantidad de Cloro:

Para desinfectar el agua apropiadamente, se necesita agregar al tanque de almacenamiento suficiente cloro para alcanzar la concentración de 150ppm. Es decir 150mg de cloro por cada litro de agua.

Procedimiento de Cloración:

- 1) Apagar el fotomultiplicador, retirar la tapa del tanque y asegurarse de que no se exponga a la luz el fotomultiplicador
- 2) Añadir 150 mg de cloro por cada litro de agua. Para nuestro tanque que contiene 1100 Litros de agua, la dosis es **165g de cloro (Cl₂)**. Dependiendo de la presentación comercial del producto que se utilice, la cantidad de compuesto clorado que se debe añadir en el tanque es la siguiente:

Tabla 1: DOSIFICACIÓN DEL CLORO

COMPUESTO		Dosis a usarse por 1100 litros de agua
Solución	Hipoclorito de sodio (NaOCl) al 5% (50g Cl ₂ / L)	3.3 L
	Hipoclorito de sodio (NaOCl) al 10% (100g Cl ₂ / L)	1.65 L
Sólido	Hipoclorito de Calcio (Ca(OCl) ₂) al 70% (700g Cl ₂ / Kg)	236 g

- 3) Distribuir uniformemente el cloro añadido de manera que se forme una mezcla homogénea.
- 4) Esperar que el cloro actúe durante 18 horas.
- 5) Tomar una prueba de agua para realizar un prueba de cloro residual, la cual debe estar entre (25-50) partes por millón. Esta prueba sirve de partida para saber qué cantidad de cloro se consume con el paso del tiempo.
- 6) Sellar herméticamente el tanque.

ACCIÓN DEL CLORO

- En una primera etapa, se produce la oxidación de sustancias reductoras, principalmente inorgánicas: Fe^{2+} , Mn^{2+} , H_2S . Todo el hipoclorito que se añade se consume, con lo cual no hay cloro disponible.
- Una vez destruidas estas sustancias, se inicia una etapa en la que se formarían compuestos clorados, principalmente cloraminas, que actuarían como cloro residual, otorgando un carácter desinfectante al sistema.
- Cuando todo el amoníaco y las aminas orgánicas han reaccionado con el cloro, se inicia una etapa de destrucción de estos compuestos clorados formados en la etapa anterior. Después del punto de ruptura, todo el cloro que se añade se mantiene como cloro libre. Así pues, se considera que a partir de este punto tanto la desinfección como la eliminación de materia orgánica oxidable por cloro, se ha llevado a cabo y el agua tiene un cierto valor de cloro libre residual, el cual se va consumiendo paulatinamente de acuerdo a las condiciones del sistema.

CONTROL DE LA CLORACIÓN

La cloración es correcta siempre que se encuentre en valores de cloro residual mayor a 1.5 ppm. Se deben realizar pruebas de cloro residual cada tres meses, para determinar la cantidad de cloro que se ha volatilizado o consumido debido a la temperatura y otras características del medio [9]. Para realizar estas pruebas no es necesario destapar el tanque, existe una válvula de descarga como se observa en el gráfico 1, por donde se puede obtener una muestra de 20ml de agua, dicha

cantidad de agua es suficiente para realizar una prueba in situ de cloro residual.

Gráfico 1



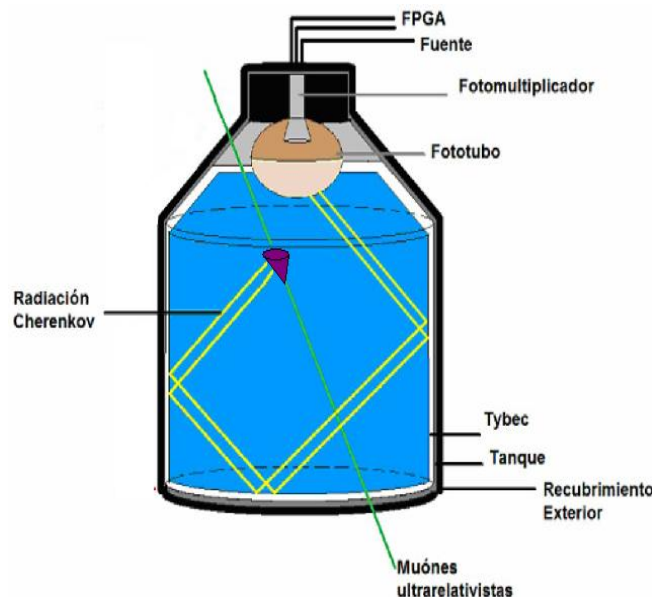
¿CADA CUANTO TIEMPO SE DEBE CLORAR?

La concentración de cloro libre residual asegura una protección posterior al tratamiento [5]. Es este parámetro el cual determina el tiempo de cloración. El tiempo de duración del cloro libre residual, depende de muchos parámetros, los principales son:

- La temperatura:** el sistema tiene una temperatura que depende de la temperatura exterior, durante un día soleado aumenta aproximadamente 10°C , cuando la temperatura es menor a 15°C , la temperatura es igual a la temperatura exterior, es decir se tiene un rango de temperaturas entre $(8-42)^{\circ}\text{C}$.
- El pH:** Se conoce que el cloro es más efectivo inactivando ciertos microorganismos como *Entamoeba histolytica*, *E. Coli*, Coliformes y Polivirus, mientras más bajo sea el pH [3].

El hecho de tener un tanque con características particulares, requiere realizar un seguimiento al comportamiento del sistema, para ello se realizaron pruebas de cloro residual durante dos meses, mediante las cuales se determinó que durante el primer mes se consumió 0.4 mg de cloro por cada litro de agua y en el segundo mes se consumió 0.09 mg de cloro por cada litro de agua del tanque "Chimbita", gráfico 3. Esto significa que se consume 0.025 mg de cloro por litro de agua diariamente. Suponiendo que el valor de cloro residual inicial es 25 ppm, se requiere una nueva cloración después de 1000 días, es decir 2,73 años después. Este cálculo es aproximado, para saber la fecha exacta de nueva cloración o cambio de agua se debe realizar pruebas de cloro libre residual cada 3 meses, y determinar el ritmo de disminución del cloro. Se debe tener en cuenta que si el resultado es mayor a 5 ppm, el agua no necesita ser clorada nuevamente

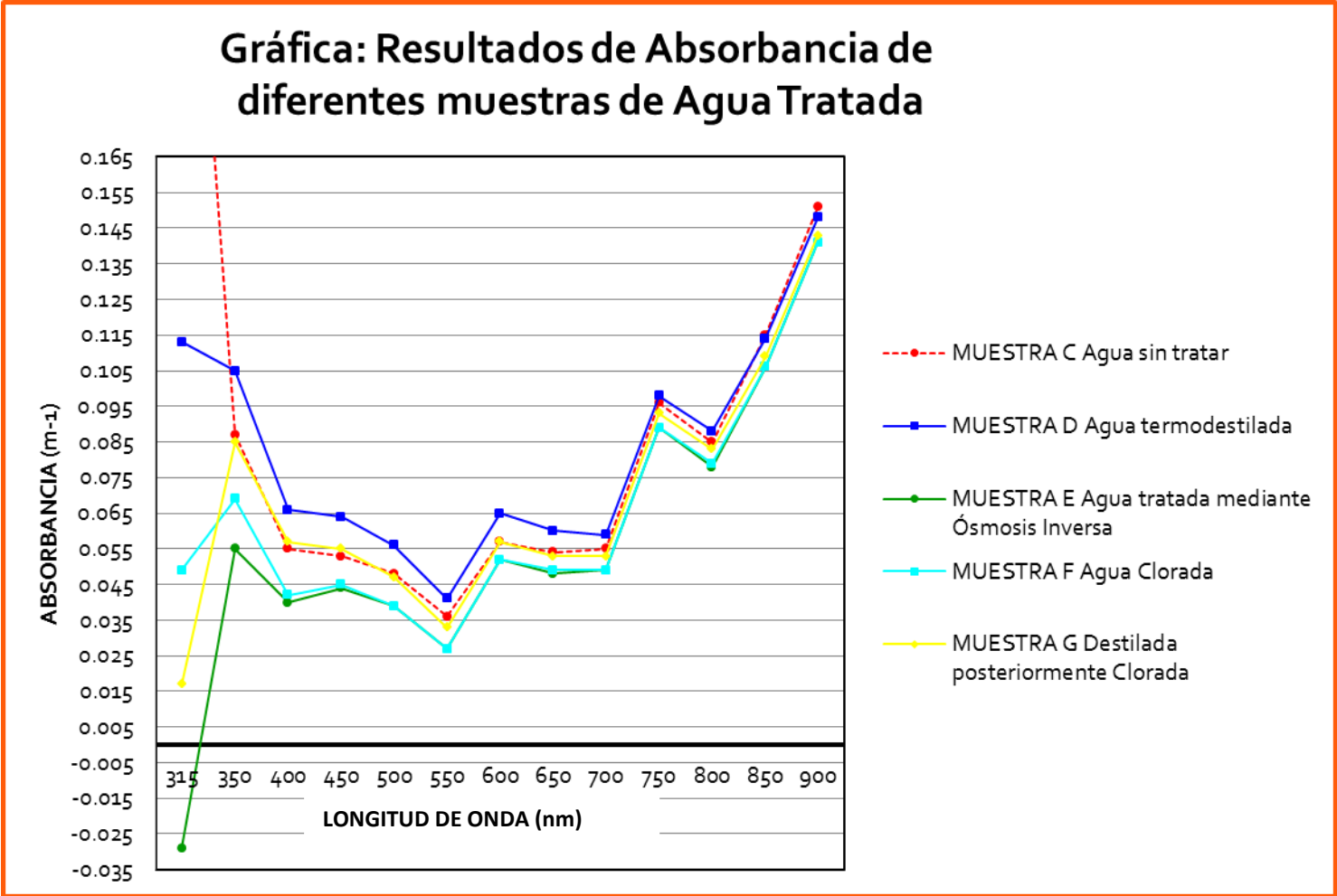
Gráfico 2



Resultados de la Cloración

Comparación con otros tratamientos.

La finalidad del agua es ser el medio propagador de los fotones Cherenkov y no absorberlos durante su trayectoria, hasta que llegan al fotomultiplicador [1]. Para ello la absorbancia debe ser lo más baja posible en el rango de (350 a 750) nm, lo cual se logró mediante la cloración como se puede observar en la siguiente gráfica:



Indicadores de Buena Calidad de Agua

¹ Protocolo de Purificación de agua. [10]
² Norma Técnica Ecuatoriana (NTE INEN 1 108:2006 Segunda Revisión) [3]
³ Agua tipo II, según CAP (Colegio Americano de Patólogos) y NCCLS (Comité Nacional de Estándares para Laboratorios Clínicos

Parámetros	Valores permitidos	Estado del agua después de la Cloración
Turbidez ¹	< 2 NTU	0.65 NTU
pH ²	(6.5-8.5)	7.75
Conductividad ²	<0.5 $\mu\Omega$	0.5 $\mu\Omega$
Colonias Coliformes Totales UFC/100ml ³	0	0
Colonias Coliformes Fecales UFC/100ml ³	0	0

Recomendaciones:

1. Tener precaución el momento de manipular el cloro. No ingerir, inhalar o tener contacto directo con la piel ya que es tóxico. Recuerde, el cloro es volátil. Trabaje en un área bien ventilada cuando esté manipulando o mezclando soluciones de cloro. Siempre use protección para los ojos, guantes de hule, pantalones largos y camisa de manga larga cuando manipule y mezcle cloro.
2. Asegurarse de que el tanque quede completamente sellado luego de la cloración. Cualquier rayo de luz exterior podría saturar el fotomultiplicador.
3. Realizar trimensualmente la prueba de cloro libre residual.
4. De preferencia utilizar Hipoclorito de calcio en polvo o en tabletas, ya que su efecto desinfectante es mayor y es menos volátil que el hipoclorito de sodio líquido.
5. En caso de usar hipoclorito de cloro líquido al 5 por ciento, elegir la variedad simple, sin olor ni otros aditivos.
6. Pasado los 2 años, se recomienda el cambio de agua y revisión del tanque.

Gráfico 3



Referencias:

1. JELLEY J. V., Cerenkov Radiation And Its Applications. Published for the United Kingdom atomic energy authority. Gran Bretaña: Page Bros. (Norwich) Ltd., 1958., 301p.
2. LETTERMAN Raymond d., *Water Quality And Treatment*, fifth edition, United States of America: Mc Graw. Hill, INC, 1999., 560p.
3. NORMA TÉCNICA ECUATORIANA (NTE INEN 1 108:2006 Segunda Revisión). *Agua Potable. Requisitos*.
4. CAPTACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE AGUA LLUVIA, disponible en: <http://www.pnuma.org/recnat/esp/documentos/cap3.pdf>, última fecha de acceso: 25/09/2012
5. CLORACIÓN DE AGUA POTABLE, disponible en: http://www.itc.es/pdf/Technical_documents/Agua-marca-Esp.pdf, última fecha de acceso: 10/09/2012
6. CUADROS PARA LA CLORACIÓN DEL AGUA, http://www.seg-social.es/ism/gsanitaria_es/ilustr_anexos/anexo8.htm, última fecha de acceso: 30/08/2012
7. GLACIALES, disponible en: <http://es.wikipedia.org/wiki/Glaciär>, última fecha de acceso: 25/09/2012
8. LIBRO DE PURIFICACIÓN DE AGUA DE BARNSTEAD, disponible en: http://www.cienytec.com/PDFS/Agua_Pura_laboratorio_Barnstead.pdf, última fecha de acceso: 01/10/2012
9. MÉTODOS PARA PURIFICAR EL AGUA, disponible en: <http://www.5pasossonora.com/pdf/purificarelagua.pdf>, última fecha de acceso: 01/09/2012
10. PROTOCOLO DE PURIFICACIÓN DE AGUA, disponible en: http://cevale2.uis.edu.co/~cevale2/wiki/index.php/Protocolo_de_purificacion_de_agua, última fecha de acceso: 01/09/2012
11. TRATANDO AGUA ALMACENADA CON CLORO, disponible en: <http://srwqis.tamu.edu/media/2550/shockstoredspanish.pdf>,